

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AVALIAÇÃO TÉCNICA DO FLUXO ENERGÉTICO DO
SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DO SISTEMA
DE GERAÇÃO EÓLICA DA EMBAIXADA DA ITÁLIA**

**ALLAN FERNANDES DAS CHAGAS
DAVID LUIZ FERRAZ SOARES**

ORIENTADOR: MAURO MOURA SEVERINO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2014

Allan Fernandes das Chagas – 09/0020821

David Luiz Ferraz Soares – 09/0023307

***AVALIAÇÃO TÉCNICA DO FLUXO ENERGÉTICO DO
SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DO SISTEMA DE
GERAÇÃO EÓLICA DA EMBAIXADA DA ITÁLIA***

Trabalho de conclusão de curso de
Engenharia Elétrica da Universidade de
Brasília para obtenção do diploma de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Mauro Moura Severino.

Brasília/2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO TÉCNICA DO FLUXO ENERGÉTICO DO SISTEMA DE
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA
DA EMBAIXADA DA ITÁLIA**

Allan Fernandes das Chagas – 09/0020821

David Luiz Ferraz Soares – 09/0023307

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília para
obtenção do diploma de bacharel em Engenharia Elétrica.

APROVADO POR:

MAURO MOURA SEVERINO, Dr. ENE/UNB
(ORIENTADOR)

ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO, Dr. ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)

RAFAEL AMARAL SHAYANI, Dr. ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)

Brasília, 11 de Março de 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

CHAGAS, ALLAN FERNANDES DAS e SOARES, DAVID LUIZ FERRAZ

Avaliação Técnica do Fluxo Energético do Sistema de Geração Fotovoltaica e do Sistema de Geração Eólica da Embaixada da Itália [Distrito Federal] 2014.
xv, 71p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia Elétrica, 2014). Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1.Geração distribuída

2.Sistema Híbrido

3.Geração fotovoltaica

4.Geração eólica

5.Análise técnica

6.Análise econômica

I. ENE/FT/UnB

II. Engenheiro

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CHAGAS, A. F. e SOARES, D. L. F. (2014). Avaliação Técnica do Fluxo Energético do Sistema de Geração Fotovoltaica e do Sistema de Geração Eólica da Embaixada da Itália. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação FT. Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Allan Fernandes das Chagas e David Luiz Ferraz Soares

TÍTULO: Avaliação Técnica do Fluxo Energético do Sistema de Geração Fotovoltaica e do Sistema de Geração Eólica da Embaixada da Itália.

Grau: Engenheiro

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Allan Fernandes das Chagas
CAS, Rua 03, Chácara 76, casa 6 –
72110-600 – Vicente Pires – DF –
Brasil.
allanfc7@gmail.com

David Luiz Ferraz Soares
CNB 11 lote 3/4 Apto 103 – Taguatinga Norte,
72115-115 – Taguatinga – DF –
Brasil.
davidluizfs@gmail.com

Dedico este trabalho à minha querida vovó Nanã, que me deixou um exemplo de vida sem igual, e que hoje, com certeza, está feliz lá de cima por mais essa etapa conquistada e intercedendo pelas que virão.

Allan Fernandes das Chagas

Dedico este trabalho à minha muito amada avó Maria Luisa, vovó Fia, pois sei como ela gostaria de estar presente neste momento. Mesmo não podendo estar presente fisicamente, sempre estará em meu coração por meio das boas lembranças que ficaram.

David Luiz Ferraz Soares

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por ser o meu guia de todos os momentos, dando-me serenidade, coragem e sabedoria para enfrentar todas as barreiras encontradas ao longo da minha caminhada.

À minha amada mãe, Núbia Fernandes, por todo o carinho e amor que foram base da minha criação. Agradeço por toda dedicação em me tornar uma pessoa cada vez melhor, por todas as preocupações, conselhos, ensinamentos e exemplos dados ao longo da vida, que, com certeza, foram a base para eu chegar até aqui.

Ao meu pai e herói, Hermelino Fernandes, por ser o cara que posso contar para toda hora. Agradeço pela oportunidade de ter esse exemplo de superação ao meu lado, que me mostra que vale a pena lutar pelos nossos objetivos. Obrigado por ser meu amigo e por me passar tamanha confiança, levando-me a crer que eu sempre posso ir mais longe.

À minha incomparável irmã, Aline Fernandes, pela sua presença constante em minha vida, sendo minha defensora, independentemente das circunstâncias. Agradeço por vibrar com minhas vitórias e por me dar forças para superar os meus problemas, por ter sido minha primeira e maior professora. Eu sei o que é ter uma irmã de verdade. Obrigado por tudo.

Aos meus amigos, por toda história que nós construímos, por todos os memoráveis momentos que passamos juntos e por todas as vezes que, de alguma forma, estiveram ao meu lado me ajudando e me dando forças para me tornar uma pessoa melhor.

Ao meu grande amigo e companheiro de TCC, David Luiz, por todas as barreiras que me ajudou a ultrapassar nesses 5 anos de UnB. A sua presença, com certeza, tornou essa trajetória mais simples, proporcionando também momentos que ficarão marcados para sempre.

Ao professor e orientador, Mauro Moura, por todos os conselhos dados, que ajudaram bastante no desenvolvimento desse trabalho. Agradeço por toda dedicação que muito contribuiu para nossa formação.

Ao professor Shayani, que nos acompanhou em uma das etapas do trabalho, apresentando-nos os sistemas da Embaixada, contribuindo, significativamente, com o desenvolvimento do estudo.

À Embaixada da Itália, que, por meio de seus funcionários, nos recebeu e nos deu as condições necessárias para desenvolvermos os estudos necessários para a conclusão do trabalho.

Allan Fernandes das Chagas

A Deus, por ter aberto as portas desta oportunidade e me conduzido, com seu infundo amor, dia após dia, levando-me a crescer espiritualmente e depender cada vez mais Dele.

À minha mais que amada mãe, Joana Soares, por ser minha companheira, conselheira, amando-me sempre com todo amor de seu coração e sendo o meu maior exemplo de determinação e superação. É uma grande honra ser filho de tal mulher guerreira e amorosa.

Ao meu querido pai, Edson Soares, por me amar incondicionalmente e suprir, com o suor do seu rosto, todos os meios que foram necessários nessa trajetória. Por me ensinar que, com a nossa dedicação e esforço, podemos conquistar tudo o que almejamos.

Às minhas incríveis irmãs, Deisy Ferraz e Daiany Soares, por sempre estarem presentes me ajudando em tudo. Por terem comemorado cada sucesso obtido, e por ter, em cada falha, ajudado-me a levantar e prosseguir. Por terem sido sempre um modelo em todas as circunstâncias.

À minha muito amada vovó Lulú, que me deu forças para prosseguir por meio de seu grande e terno amor. Cada dia ao seu lado é uma lição, e saber do tamanho de seu amor é o maior presente que poderia ter. Obrigado por sempre confiar e acreditar em mim!

À minha amada namorada, Drielly Faria, que nesses últimos, e mais difíceis, dois anos tem sido meu alicerce e porto seguro. O desejo de passar o resto dos meus dias ao seu lado sempre me motivou a continuar e melhorar. Obrigado pelo seu amor, paciência, companheirismo.

Aos meus sogros e cunhada, Hebert, Adriane e Lúryan Faria, por terem me recebido de braços abertos e me feito sentir parte dessa família. Agradeço pela grande amizade, fé e respeito.

Ao meu irmão de coração, Lucas Meireles, por me ensinar o valor de uma amizade verdadeira. Embora não sejamos irmãos de sangue você sempre será meu irmão mais novo e tem lugar cativo em meu coração. E também sua amável família, Ilvan, Leides e Letícia Meireles, por terem colaborado na formação do meu caráter e por sempre torcerem por mim.

Aos meus amigos e companheiros, Míriam, Matheus B., Marco, Matheus L., Kalebe e Moisés, por cada momento de descontração que manteve minha mente no lugar. Por cada aventura, lágrima e risada. Por sempre acreditarem em meu potencial.

À minha segunda mãezinha Ana Cláudia, por seu amor tão grande, pelas muitas horas em que me escutou, aconselhou e consolou. Por sua total confiança em mim. Nosso laço, mesmo que não de sangue, é forte, verdadeiro e nunca se romperá.

À igreja em Taguatinga, aos serviços de música da EAV e regional do DF por me ajudarem a crescer humana e espiritualmente, trabalhando meu caráter numa esfera saudável e fraternal.

Ao meu grande amigo Leonardo Borges, pela imprescindível ajuda durante os 5 anos de UnB.

Ao meu excepcional amigo José Felipe, por ser um grande exemplo de amigo, profissional e pessoa. Por ter me mostrado que podia chegar muito além do que imaginava.

A toda equipe da OIEE, Eletronorte, em especial ao gerente, Davidson Campos, pelo ano em que pude conviver e aprender com cada um, me ajudando tanto acadêmica quanto profissionalmente.

Ao meu inesquecível amigo e parceiro de TCC, Allan Fernandes, por ser aquele em que pude contar sempre nesses cinco anos. Sem sua amizade, seu companheirismo e ajuda, tenho plena certeza que não teria chegado aonde cheguei. Obrigado por cada momento que se eternizou.

Ao professor e orientador, Mauro Moura, por sua competente e importante orientação, por cada troca de conhecimento que possibilitou o presente estudo.

À Embaixada da Itália, em especial ao eletricitista Bill, por todo o suporte dado que foi de grande valia durante esse processo.

David Luiz Ferraz Soares

RESUMO

AVALIAÇÃO TÉCNICA DO FLUXO ENERGÉTICO SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA DA EMBAIXADA DA ITÁLIA

Este trabalho apresenta uma avaliação técnica do sistema de geração fotovoltaica (SGFV) e do sistema de geração eólica (SGE) da Embaixada da Itália no Brasil. Esses sistemas são conectados à carga da Embaixada e também estão ligados ao barramento da distribuidora de energia elétrica, podendo, assim, fornecer sua energia excedente à rede.

Para o desenvolvimento do projeto, é feita inicialmente uma análise da atual situação do sistema de energia elétrica, por meio de uma discussão sobre o tema de geração distribuída, descrevendo a geração fotovoltaica e a geração eólica, com suas características e tecnologias desenvolvidas.

A avaliação técnica do SGFV e do SGE foi realizada por meio de discussões conceituais, de análises dos equipamentos do sistema e de simulações computacionais. Após, foram feitas com base em incertezas, representadas por variáveis aleatórias, tornando possível a avaliação do comportamento dos sistemas, com base nas premissas adotadas. Foi observado o desempenho técnico dos sistemas, com apresentação de valores energéticos de entrada e saída, além de faixas de rendimentos energéticos parciais e total. Para isso, realizou-se uma avaliação das condições climáticas, com relação a irradiação solar e situação do vento na região. Também foi realizada uma estimativa da economia gerada por essa energia produzida, considerando os últimos 3 anos.

Os resultados obtidos permitiram a conclusão de que a metodologia utilizada nas simulações satisfaz os objetivos do trabalho, pois as tabelas, os gráficos e esquemas gerados facilitaram bastante a visualização do comportamento do sistema energético da Embaixada como um todo, para as diversas possibilidades a que ele está sujeito.

Palavras-chaves: Geração distribuída, geração fotovoltaica e geração eólica, análise técnica, sistema híbrido e análise econômica.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – <i>DISTRIBUIÇÃO MUNDIAL DA IRRRADIAÇÃO SOLAR</i>	11
FIGURA 2.2 – <i>SILÍCIO MONOCRISTALINO E SILÍCIO POLICRISTALINO</i>	14
FIGURA 2.3 – <i>SILÍCIO AMORFO</i>	15
FIGURA 3.1 – <i>SGDF DA EMBAIXADA ITALIANA NO BRASIL</i>	18
FIGURA 3.2 – <i>CONJUNTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS</i>	19
FIGURA 3.3 – <i>QCG E PLANTA DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICA</i>	20
FIGURA 3.4 – <i>DIAGRAMA UNIFILAR DO SGFV</i>	21
FIGURA 3.5 – <i>QCG</i>	22
FIGURA 3.6 – <i>PAINÉIS FOTOVOLTAICOS DO SGDFV DA EMBAIXADA DA ITÁLIA</i>	23
FIGURA 3.7 – <i>INVERSOR</i>	24
FIGURA 3.8 – <i>ESQUEMÁTICO DE CARGA FIXA PARA O SGFV</i>	26
FIGURA 3.9 – <i>TESTE NO SGI UNB</i>	27
FIGURA 3.10 – <i>MEDIÇÕES REALIZADAS NO SGFV</i>	29
FIGURA 4.1 – <i>DIAGRAMA DE BLOCOS</i>	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – PORCENTAGEM DE DIAS NOS ANOS DE 2011,2012 E 2013 EM QUE ESTEVE EM VIGOR O HV	47
TABELA 4.1 – IRRADIAÇÃO SOLAR, POTÊNCIAS E ENERGIA TOTAL DO SGFV	48
TABELA 4.2 – VELOCIDADE DO VENTO, POTÊNCIAS E ENERGIA TOTAL DO SGFV.....	50
TABELA 4.3 – VALORES ENERGÉTICOS ANUAIS DE 20 CASOS DA SIMULAÇÃO, EM KWh	55
TABELA 4.4 – MÉDIA, DESVIO-PADRÃO, MÍNIMO E MÁXIMO DOS 2.000 CASOS SIMULADOS	56
TABELA 4.5 – ECONOMIA GERADA PELOS SISTEMAS, SGFV E SGE.....	60
TABELA 4.6 – ECONOMIA GERADA PELO SGFV.....	62

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1 – EMISSÃO DE GÁS CARBÔNICO POR GWh	4
GRÁFICO 2.2 – CONSUMO FINAL DE ENERGIA POR FONTE.....	5
GRÁFICO 2.3 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.	6
GRÁFICO 3.1 – CURVA DA POTÊNCIA GERADA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO	24
GRÁFICO 4.1 – ENERGIAS ANUAIS OBTIDAS NA SIMULAÇÃO COM VARIÁVEIS ALEATÓRIAS.....	57
GRÁFICO 4.2 – ENERGIA EÓLICA ANUAL OBTIDA NA SIMULAÇÃO COM VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	58
GRÁFICO 4.3 – ENERGIA TOTAL DE SAÍDA DOS SISTEMAS, DECOMPOSTA PELAS PARCELAS FORNECIDAS PELO SGFV E PELO SGE	59
GRÁFICO 4.4 – DISTRIBUIÇÃO DOS RENDIMENTOS ENCONTRADOS NA SIMULAÇÃO COM VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	59
GRÁFICO 4.5 – ECONOMIA ANUAL PREVISTA, 2011, 2012, 2013, COM ACUMULADO..	61
GRÁFICO 4.6 – ECONOMIA MENSAL PREVISTA PARA CADA ANO.....	61
GRÁFICO 4.7 – ECONOMIA ANUAL DO SGFV, 2011, 2012, 2013 COM ACUMULADO	63
GRÁFICO 4.8 – ECONOMIA MENSAL DO SGFV PARA CADA ANO.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CEB – Companhia Energética de Brasília

CO₂ – Gás carbônico

GC – Geração centralizada

GD – Geração distribuída

HV – Horário brasileiro de verão

ICMS – Imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviços

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

NOCT – Nominal operating cell temperature

PRODIST – Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QCG – Quadro de controle geral CC – CA

QG – Quadro geral (QG)

SGE – Sistema de geração eólica

SGFV – Sistema de geração fotovoltaica

Si – Silício

SIN – Sistema Interligado Nacional

UnB – Universidade de Brasília

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	1
1.2	OBJETIVO DO TRABALHO	1
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
2.2	PANORAMA ATUAL DO SISTEMA ELÉTRICO	3
2.3	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	7
2.4	GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	10
2.4.1	A ENERGIA SOLAR	10
2.4.2	O EFEITO FOTOVOLTAICO.....	11
2.4.3	TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS.....	13
2.5	ENERGIA EÓLICA	15
2.5.1	ASPECTOS GERAIS	15
2.5.2	TURBINAS EÓLICAS.....	16
2.5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
3.2	MATERIAIS	18
3.2.1	SGFV DA EMBAIXADA DA ITÁLIA	18
3.2.1.1	ASPECTOS GERAIS	18
3.2.1.2	OS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	22
3.2.1.3	INVERSORES	23
3.2.2	SGE DA EMBAIXADA DA ITÁLIA.....	24
3.2.3	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.....	25
3.2.4	CARGA FIXA.....	26
3.2.5	FERRAMENTA COMPUTACIONAL	26
3.3	MÉTODOS.....	27
3.3.1	MEDIÇÕES.....	27
3.3.2	SIMULAÇÕES.....	29
3.3.2.1	ASPECTOS GERAIS	29
3.3.2.2	SIMULAÇÃO DO SGFV	30
3.3.2.3	SIMULAÇÃO DO SGE.....	35
3.3.2.4	DIAGRAMA DE BLOCOS	40
3.3.2.5	ANÁLISE ECONÔMICA	46
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48

4	RESULTADOS E ANÁLISES	49
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	49
4.2	SGFV	49
4.3	SGE	51
4.4	DIAGRAMA DE BLOCOS	53
4.5	TABELAS	56
4.6	GRÁFICOS	58
4.7	ECONOMIA GERADA PELOS SISTEMAS	61
4.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	66
5.1	ASPECTOS GERAIS	66
5.2	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	67
5.3	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O atual panorama do sistema energético mundial passa por uma fase de mudanças em sua estrutura. O aumento da demanda de energia elétrica, causado pelo crescimento da população, e pelo aumento do consumo por habitante, aliado às preocupações com o meio ambiente, tendo como consequência a busca por fontes renováveis de energia, impulsionam essa mudança de paradigma, modificando a organização do sistema.

Nesse contexto, surge a ideia de geração distribuída (GD), ocupando parte do espaço que pertence à tradicional geração centralizada (GC). Trata-se de uma forma de geração descentralizada, em que o consumidor pode produzir sua própria energia e, em alguns casos, ainda fornecer energia para a rede da distribuidora. Para que isso ocorra, estudos e investimentos devem ser realizados na busca pelo desenvolvimento de fontes energéticas que tenham um custo capaz de competir com os valores da energia elétrica convencional.

Dentre as fontes utilizadas na GD estão a energia fotovoltaica e a eólica. A energia elétrica gerada por essas fontes é resultado do aproveitamento de energias fornecidas pelo meio ambiente, no caso da fotovoltaica, a irradiação solar e, no caso da eólica, o vento. A instalação dos equipamentos responsáveis por essas formas de geração de energia elétrica deve ser precedida de uma análise de sua viabilidade técnica e econômica no local em que serão utilizados.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo o estudo do sistema de geração fotovoltaica (SGFV) e do sistema de geração eólica (SGE) da Embaixada da Itália no Brasil, com uma análise técnica e uma estimativa de qual a economia que os sistemas proporcionaram à Embaixada nos 3 últimos anos. Uma simulação computacional foi realizada, apresentando uma análise do fluxo energético do sistema como um todo, para isso foram consideradas algumas incertezas, que são representadas por variáveis aleatórias, tornando possível um estudo probabilístico do desempenho do sistema. Vale destacar que a ideia da Embaixada ao utilizar essas fontes energéticas está relacionada a um projeto voltado a questões de incentivo ao desenvolvimento sustentável, na busca da preservação do meio ambiente, conhecido como Embaixada Verde.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em 5 capítulos, organizados de forma a haver um embasamento para o desenvolvimento das ideias, com uma progressão lógica que facilite o entendimento do tema. Ele inicia-se por este que traz uma noção do que se trata o estudo e da organização estrutural do projeto.

O Capítulo 2 presta-se a apresentar o embasamento teórico necessário para que se dê sequência ao restante das análises. Ele é composto por uma revisão bibliográfica com os temas relevantes ao projeto, estando entre eles o atual panorama do sistema elétrico, os problemas que estão sendo enfrentados e as tendências para o futuro, chegando, assim, ao tema de GD, tratando de forma específica as características principais da geração fotovoltaica e eólica.

O Capítulo 3 apresenta todos os materiais utilizados no trabalho, com uma descrição dos equipamentos que compõem o SGFV e o SGE, os instrumentos de medição utilizados e o *software* responsável pelas simulações. Também mostra detalhadamente a metodologia aplicada, com equações, premissas e técnicas adotadas, dando o suporte suficiente à continuidade do tema.

O Capítulo 4 é responsável pela apresentação dos resultados obtidos nas simulações com os gráficos, as tabelas e diagramas gerados, acompanhados de uma análise de seus valores, com comparações relacionadas ao que era esperado.

O Capítulo 5 tem como objetivo mostrar as conclusões a que se chegou por meio do estudo realizado, principalmente com relação aos resultados obtidos e o objetivo inicial do trabalho, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A energia elétrica é essencial para o desenvolvimento das sociedades atuais. A modernização, acompanhada das grandes inovações tecnológicas, só se torna possível com a presença da eletricidade. Sendo assim, é imprescindível que tal energia seja fornecida com qualidade adequada e de forma confiável. As grandes usinas elétricas necessitam de uma forma complementar de geração de energia que possibilite o atendimento ao aumento de demanda. Além disso, questões como as de sustentabilidade, acesso universal à energia elétrica e questões sociais e econômicas abrem margem para um novo panorama de geração elétrica.

Nesse contexto, existe uma tendência onde essas grandes usinas, hidrelétricas, nucleares e termoeletricas, dividirão espaço com micro gerações, que estarão localizadas na unidade consumidora, conhecidas como geração distribuída (GD).

Dessa forma, considerando a relevância do tema, este capítulo tem como objetivo explicar a atual situação do sistema elétrico brasileiro e mundial, apresentando os problemas encontrados para essas circunstâncias, e as perspectivas para o futuro, abordando o tema de GD, com seus conceitos, aplicabilidade, vantagens e desvantagens, além de tratar, especificamente, acerca das características das gerações fotovoltaica e eólica.

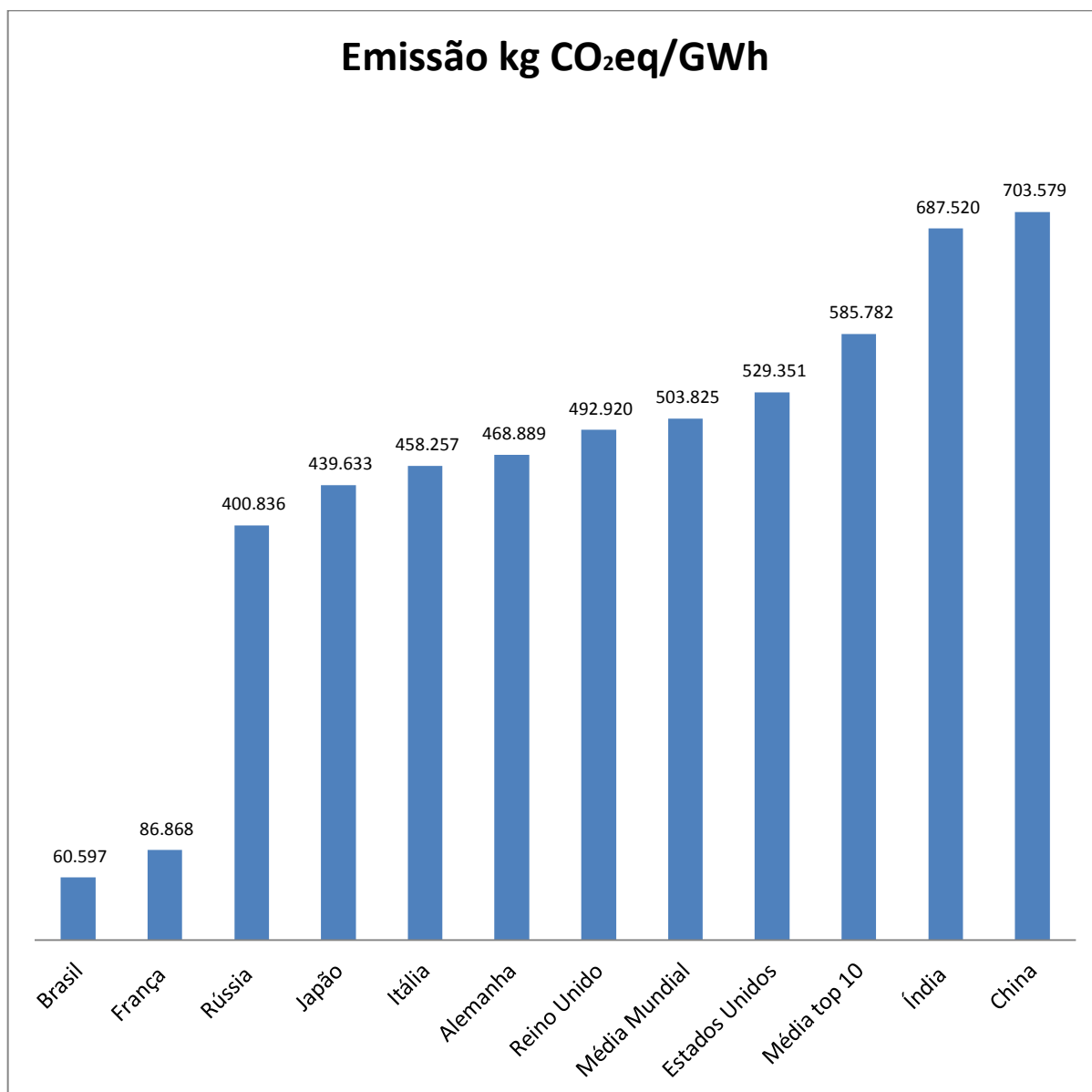
2.2 PANORAMA ATUAL DO SISTEMA ELÉTRICO

A matriz energética mundial tem amplo domínio do petróleo e dos demais combustíveis fósseis em sua estrutura. Esse é um fato preocupante no que diz respeito às consequências ambientais, uma vez que tais fontes são responsáveis por grande parte da emissão de gás carbônico (CO_2), o principal gás relacionado ao agravamento do efeito estufa, fenômeno causador do aumento da temperatura do planeta (FGV, 2013).

A eletricidade não foge desse contexto, pois também possui grande dependência de combustíveis fósseis. Como exemplo disso pode-se citar o carvão mineral, maior fonte para produção de energia elétrica no mundo.

A matriz energética brasileira é referência quando se trata de energia renovável, impulsionada principalmente pelas grandes hidrelétricas encontradas no país. Considerando-se os 10 maiores países do mundo, o Brasil está em primeiro lugar em qualidade da matriz de geração

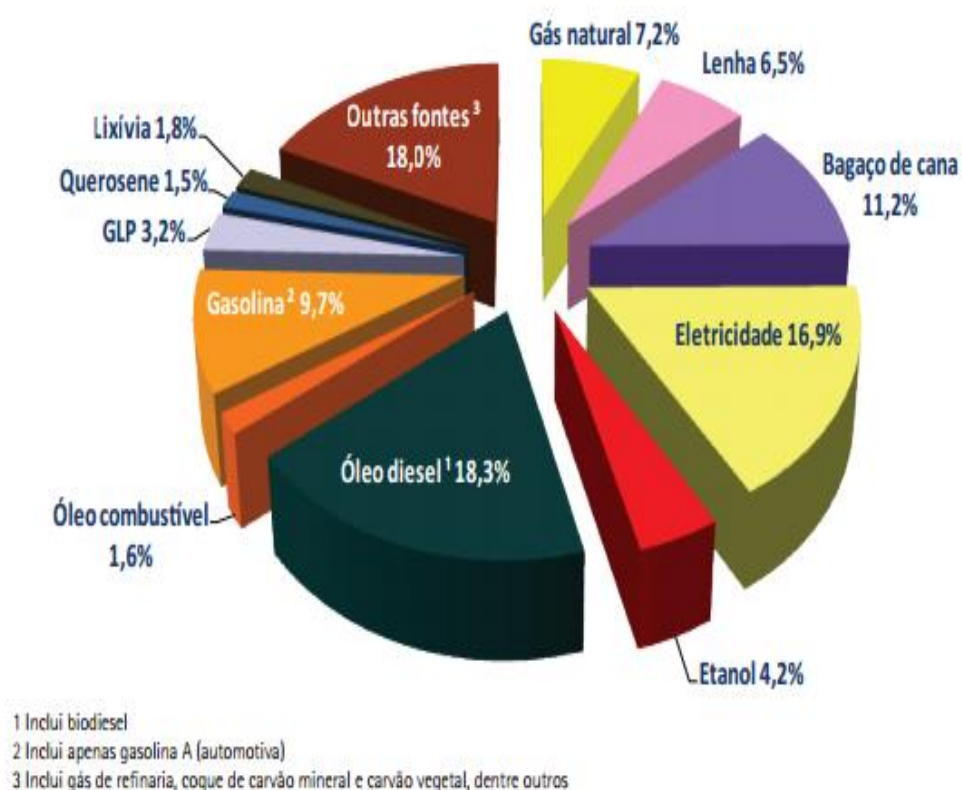
de energia elétrica, uma vez que é o que menos produz CO₂ para cada GWh de energia elétrica gerada, como pode ser observado no Gráfico 2.1.



Fonte: Sistema FIRJAN, com dados da Agência Internacional de Energia e da Comissão Europeia (2012).

Gráfico 2.1 *Emissão de gás carbônico por GWh.*

A eletricidade possui uma parcela significativa do consumo energético brasileiro, sendo responsável por atividades determinantes para o desenvolvimento do país. Em 2012, o consumo de energia elétrica correspondeu a 16,9% do consumo total de energia, como pode ser observado no Gráfico 2.2 (BEN, 2012).



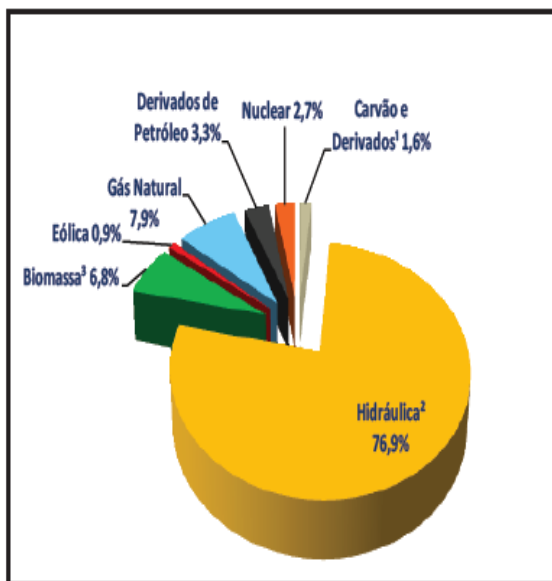
Fonte: Balanço Energético Nacional 2013.

Gráfico 2.2 *Consumo final de energia por fonte.*

A análise da matriz elétrica possibilita uma forma de visualizar em que proporções estão divididas as fontes geradoras de energia elétrica de um país. O Gráfico 2.3 mostra a matriz elétrica brasileira de 2011 e 2012, sendo possível identificar as mudanças ocorridas de um ano para o outro e ter noção das tendências futuras.

Fica evidente a predominância da geração hidráulica com 76,9% em 2012 e 81,8% em 2011. Contudo, percebe-se uma tendência de redistribuição da geração elétrica do sistema, observada pela diminuição da contribuição da geração hidráulica e pelo aumento da contribuição de outras formas de geração, tais como a da eólica, que subiu de 0,5% para 0,9%; e a do gás natural, que subiu de 4,4% para 7,9%.

Brasil (2012)



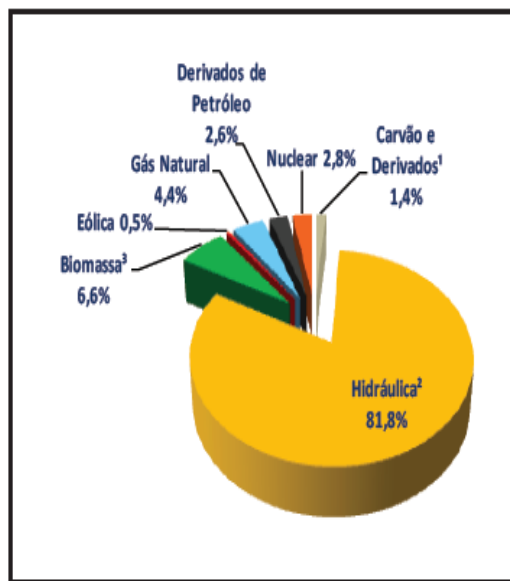
geração hidrúlica² em 2012: 455,6 TWh
 geração total² em 2012: 592,8 TWh

¹ Inclui gds de coqueria

² Inclui importação

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lúvia e outras recuperações.

Brasil (2011)



geração hidrúlica² em 2011: 464,2 TWh
 geração total² em 2011: 567,7 TWh

Fonte: Balanço energético nacional 2013.

Gráfico 2.3 *Matriz elétrica brasileira.*

A grande parcela de geração hidrúlica no Brasil é justificada pela sua capacidade hídrica, possuindo 12% da água doce superficial do mundo, colocando o país entre os cinco maiores potenciais técnicos de aproveitamento da energia hidrúlica do planeta. Esse fato também coloca o Brasil entre os países que possuem maior predominância de fontes renováveis de energia, o que é importante ao se considerar a disponibilidade de recursos na natureza com o passar do tempo (Portal Brasil, 2011).

O funcionamento das usinas hidrelétricas depende de condições climáticas favoráveis, uma vez que a produção de energia está associada ao volume de água armazenado nos reservatórios dos rios. Isso representa um limitador para tal forma de produção, mesmo se tratando de uma fonte renovável de energia, sendo necessário que existam formas alternativas de geração que supram o crescente aumento de consumo elétrico.

As grandes usinas hidrelétricas trazem consigo diversos impactos ambientais, sociais, econômicos e culturais, devido à intensa transformação das regiões onde se instalam. Sendo assim, a cada investimento realizado nessa área deve haver um estudo profundo do local onde

ocorrerá a construção da usina, constituindo-se um fator limitador da utilização dos recursos hídricos presentes em abundância no país (VECHIA, 2012).

Dessa forma, fica evidente que é necessário que haja uma mudança na forma de produção de energia tanto no Brasil, procurando alternativas que dividam espaço com as usinas hidrelétricas, quanto no mundo, em busca de fontes de energia que ocupem parte do espaço dos combustíveis fósseis. Em ambos os casos diminuindo impactos ambientais, sociais e econômicos, e buscando um aumento na produção de energia elétrica que supra com as necessidades de consumo futuras, impulsionados pelo desenvolvimento tecnológico.

Como alternativa para tal situação existe uma tendência para uma nova forma de geração de energia elétrica, onde o consumidor poderá produzir sua própria energia, ou parte dela, localizada em sua própria unidade consumidora. Esse espaço está sendo preenchido por formas de geração que causam menores impactos ambientais e sociais e que necessitam de menores investimentos, uma vez que a energia será gerada próxima ao consumo.

Assim, a tradicional geração centralizada (GC), representada por grandes usinas geradoras de eletricidade, localizadas em pontos distantes da carga, com necessidade de extensas linhas de transmissão e distribuição, passará a dividir espaço com a GD, micro gerações localizadas próximas à carga, impulsionadas pelo desenvolvimento tecnológico no sistema elétrico, que reduz o custo da energia produzida valorizando cada vez mais este tipo de geração.

2.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Existe uma dificuldade para se atribuir uma definição exata para geração distribuída. Sendo assim, cada autor a define de acordo com seu interesse, adequando-a à sua realidade. Alguns aspectos podem servir como base para definição de GD, como propósito, localização, potência, tecnologia, impacto ambiental, entre outros. Para este trabalho, será adotada a definição de GD como uma forma de geração de energia elétrica que se difere da GC por produzir uma quantidade de energia consideravelmente inferior ao dela, micro geração, estando localizada mais próxima da carga, em locais onde não seria instalada uma usina geradora convencional, não necessitando de extensas linhas de transmissão, podendo estar ligada diretamente à rede de distribuição, ou conectada ao lado de um consumidor conectado a algum ponto do sistema elétrico, ou suprimindo cargas elétricas de uma instalação eletricamente isolada (SEVERINO, 2008).

Como foi visto, a indústria da energia elétrica passará por mudanças significativas com essa nova organização na geração de energia elétrica, com consumidores residenciais, comerciais e industriais podendo produzir sua própria energia elétrica, não estando totalmente dependente da fornecida pelo sistema elétrico. Dessa forma, a GD modificará o mercado de eletricidade com novas tecnologias, criando uma concorrência relacionada à venda da energia (WILLIS e SCOTT, 2000).

O esperado é que tal situação resulte em uma melhora no atual sistema elétrico de potência, onde a combinação entre a GD e o sistema tradicional melhore a qualidade dos serviços com custos menores, comparados à atuação isolada das duas formas de geração (SEVERINO, 2008).

De maneira geral, a GD é constituída de pequenas estações de geração elétrica, produzindo energia suficiente para o consumo de uma residência, indústria ou comércio, podendo ter como fontes combustíveis fósseis, como, óleo combustível, diesel, gás natural; ou uma fonte renovável, como sol e vento.

Existem alguns questionamentos a respeito da viabilidade da GD, mas alguns especialistas acreditam que tal forma de geração tenha papel importante no futuro da indústria de energia elétrica, sendo solução para vários problemas apresentados pelo atual modelo do sistema elétrico, como por exemplo, a dificuldade de acesso à energia elétrica por comunidades isoladas. Porém, não se trata de uma tecnologia simples de ser utilizada, como muitos defensores da GD tratam o assunto, defendendo sua implementação no sistema. Por outro lado, existe uma oposição que não reconhece os benefícios que tal tecnologia pode trazer, valorizando apenas seus aspectos negativos (SEVERINO, 2008). Dessa forma, é importante que se realize uma análise dos pontos favoráveis e desfavoráveis da GD.

Algumas das vantagens da GD são (ROMAGNOLI, 2005; RODRÍGUEZ, 2002; DIAS, BORTONI e HADDAD, 2005; apud SEVERINO, 2008; PAIVA, et al, 2009; apud CAMARGOS, 2013):

- produção de potência próxima do consumo;
- unidades de GD podem ter índices de confiabilidade elevados;
- consumidor pode ser suprido de energia de ótima qualidade, considerando tensão, frequência e conteúdo harmônico;
- ótima alternativa para atendimento a comunidades isoladas, onde a alimentação pela rede convencional de transmissão e distribuição é inviável;

- redução de perdas nas linhas de transmissão e distribuição;
- benefícios ambientais ao se utilizar fontes limpas de energia, que são muito comuns na GD, como a energia solar e a energia eólica;
- facilidade de aplicação de diferentes técnicas de gerenciamento da demanda; e
- operação em horários de ponta, diminuindo a flutuação de preço (CAMARGOS, 2013).

Algumas desvantagens da GD são (ROMAGNOLI, 2005; RODRÍGUEZ, 2002; DIAS, BORTONI e HADDAD, 2005; apud SEVERINO, 2008; PAIVA, et al, 2009; apud CAMARGOS, 2013):

- o impacto causado pela GD no sistema de proteção das atuais redes de distribuição;
- o aparecimento de fluxos contrários aos convencionais;
- a necessidade de monitoração constante da qualidade da energia;
- as dificuldades normativas, devido às especificidades de cada rede e da própria GD;
- os custos muito altos, maiores que os da maioria das opções de GC;
- dependência, para certos tipos de fontes utilizadas, de condições naturais favoráveis, como sol e vento; e
- aumento no nível de curto circuito, competição por regulação de tensão e harmônico e flutuação de potência ativa.

Embora o assunto de GD seja considerado recente, já existem normas nacionais e internacionais a respeito da conexão de pequenos geradores à rede de distribuição (SHAYANI, 2010).

Nacionalmente, o Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) estabelece normas e padrões para os procedimentos técnicos do funcionamento e desempenhos das redes de distribuição de energia elétrica. Existe a previsão no PRODIST de centros de despacho de energia, limitando a potência a ser injetada pela GD na rede de distribuição, controlando a tensão e a potência reativa, tratando sobre a desconexão de cargas geradoras, quando necessário, e definindo previsões de produção de energia (SHAYANI, 2010).

Também existe a Resolução nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que trata dos micro e minigeradores de energia renovável e suas especificações. Ela cria um sistema de compensação de energia que permite que o consumidor instale pequenos geradores em sua unidade consumidora e que troque energia com a distribuidora local. Uma das

principais consequências dessa legislação será o impulso dado em direção ao avanço da energia solar no país. Esses tipos de regulamentações são muito importantes para possibilitar uma maior viabilidade para investimentos voltados a esse tipo de geração, buscando sempre a valorização de fontes limpas de geração de energia elétrica.

Existem ainda normas técnicas para cada distribuidora de energia do país, que definem os requisitos de informações técnicas relacionados à conexão de GD à rede, facilitando o atendimento do consumidor, contendo critérios e padrões técnicos, como, forma de conexão, sistemas de proteção, sistemas de medição e o padrão de entrada; além de questões relacionadas à qualidade da energia gerada quanto aos fenômenos de tensão em regime permanente, faixa operacional de frequência, injeção de componentes de corrente contínua (CC) na rede, e harmônicas; e por fim, requisitos de segurança da GD, como a forma que deve ser feita a desconexão evitando-se o ilhamento, além da reconexão da GD à rede, o aterramento e a proteção contra curto-circuito (CAMARGOS, 2013).

2.4 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

2.4.1 A ENERGIA SOLAR

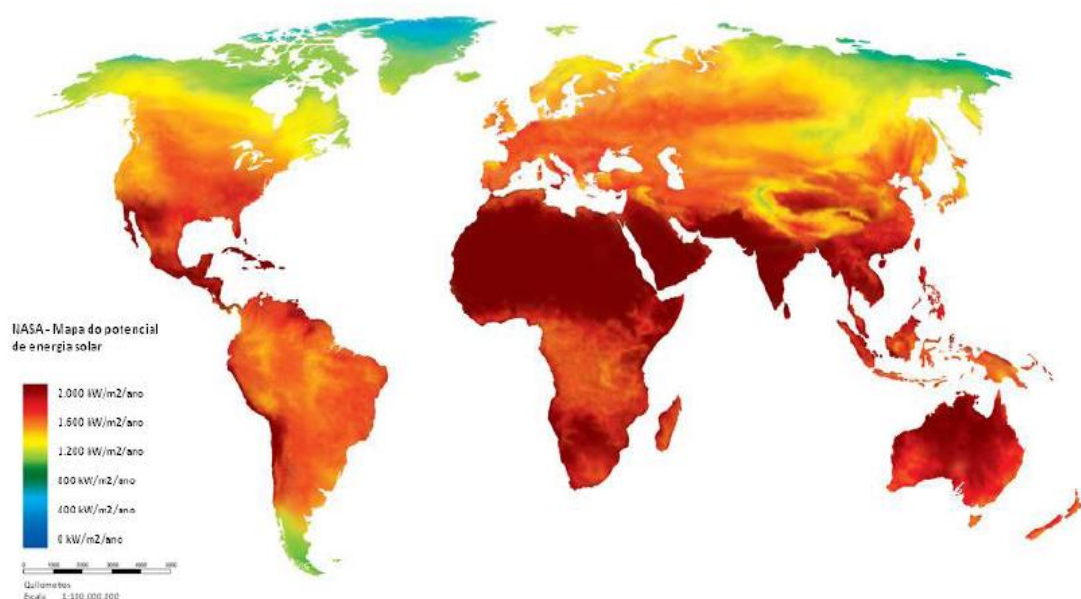
A energia solar possui um potencial muito grande, pois, além de ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica para aquecimento e para geração de potência elétrica e mecânica, outras fontes de energia advêm dela, tais como hidráulica, eólica, energia dos oceanos e biomassa. Ainda vale ressaltar que todas as formas de energia citadas, oriundas da energia solar, são limpas e renováveis, o que é muito importante ao considerar-se a busca pelo desenvolvimento sustentável (ANEEL, 2005).

A quantidade de energia solar incidente sobre a Terra, na forma de ondas eletromagnéticas, geradas a partir de uma fusão nuclear, onde ocorre a conversão de H_2 em He , tem um valor bem superior ao do consumo mundial de energia. Em poucos dias, essa energia é capaz de superar os valores da energia armazenada em todas as fontes fósseis do planeta, como petróleo, gás natural e carvão (SEVERINO, 2008). De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, o Brasil recebe, por ano, energia solar na ordem de 1.013 MWh, correspondendo a cerca de 50.000 vezes o consumo anual do país.

Toda essa potencialidade da energia deve ser acompanhada de investimentos em prol do aproveitamento da mesma, precisando existir incentivos que viabilizem a utilização dela. Uma boa forma de aumentar sua utilização é o uso como forma de geração elétrica pelo próprio

consumidor, inserindo-a como parte integrante da GD. Para que isso ocorra, um dos fatores determinantes é que os custos de instalação e de manutenção dos equipamentos responsáveis pela conversão de energia solar em energia elétrica tenham um valor capaz de competir com o do fornecimento de energia pelo sistema elétrico tradicional.

Outra característica importante da energia solar incidente sobre o planeta é o fato de que ela possui uma distribuição mais homogênea entre as regiões do globo quando comparada às principais reservas de combustíveis, com um destaque para as regiões próximas à linha do Equador, como pode ser observado na Figura 2.1 (ANDRADE, 2013).



Fonte: NASA – National Aeronautics and Space Administration. *NASA Map of World Solar Energy Potential*. Disponível em: <www.nasa.gov>. Acesso em 14 de janeiro de 2013.
Figura 2.1– Distribuição mundial da irradiação solar.

2.4.2 O EFEITO FOTOELÉTRICO

Pode-se converter diretamente a irradiação solar em energia elétrica, por meio de efeitos da irradiação, calor e luz, sobre determinados materiais, os semicondutores. O silício (Si) é o material que se destaca quanto à sua capacidade de excitação de seus elétrons com a presença de luz, tendo como consequência o efeito fotovoltaico. As condições de iluminação do sol determinam a quantidade de energia elétrica que pode ser produzida. Dessa forma, um dia a céu aberto, com poucas nuvens, propicia uma maior produção de energia. Isso traz a consequência de a geração possuir uma forte dependência das condições ambientais.

O efeito fotoelétrico foi relatado pela primeira vez por Edmond Becquerel, físico francês, em 1839. Este efeito consiste no surgimento de uma diferença de potencial nas extremidades de um semicondutor, causado pela absorção de luz incidente (SEVERINO, 2008).

Para que se entenda a conversão de energia solar em energia elétrica deve-se realizar um estudo a respeito da constituição da matéria, permitindo o conhecimento do modo de operação de uma célula fotovoltaica. Os elementos químicos são formados por prótons, nêutrons, localizados no núcleo, e elétrons, localizados em órbitas de diferentes níveis de energia ao redor do núcleo, a permanência em órbitas mais internas exige menos energia dos elétrons que a nas órbitas mais externas.

O átomo de silício possui 14 elétrons distribuídos ao redor de seu núcleo, sendo que, desses, 4 estão na camada mais externa, interagindo com os átomos vizinhos. Sabe-se que para atingir a estabilidade um átomo precisa de 8 elétrons em sua camada de valência. Dessa forma, um átomo de silício necessita de realizar ligações que lhe ofereçam mais 4 elétrons. A ligação realizada entre os átomos de silício é a ligação covalente, onde ocorre um compartilhamento de elétrons. Os elétrons da camada de valência de um átomo interagem com os átomos vizinhos, o arranjo das combinações entre os átomos de silício é chamado de cristal. Cada átomo faz uma ligação covalente com um elétron de cada um de outros 4 átomos vizinhos, completando a camada externa de todos do arranjo.

Essas ligações covalentes podem ser rompidas quando um elétron recebe energia externa suficiente para afastá-lo de seu núcleo, entrando na chamada banda de condução. Com a saída desse elétron de sua banda de valência, origina-se uma lacuna no átomo, nome dado ao local que era ocupado pelo elétron excitado, gerando, assim um par elétron-lacuna. Para o caso de um material composto apenas por silício, essa situação se desfaz rapidamente, pois o elétron energizado, que entrou na banda de valência, ocupa imediatamente uma lacuna formada pela saída de outro elétron, perdendo sua energia por dissipação de calor, não sendo possível conduzir corrente elétrica para determinado circuito (SHAYANI, 2006; apud SEVERINO, 2008).

Com objetivo de aproveitamento dessa situação para produção de corrente elétrica, utiliza-se da chamada dopagem do material semicondutor. Isso consiste em uma criação de campo elétrico na estrutura, possibilitando o aproveitamento da corrente elétrica gerada. Trata-se de adicionar átomos com 5 elétrons em sua camada de valência, tais como o fósforo, ao silício. Dessa forma, a estrutura cristalina originada corresponde a 4 elétrons do fósforo que se ligam a 4 átomos de silício, ficando, dessa forma, um elétron do fósforo livre. Ao receber uma

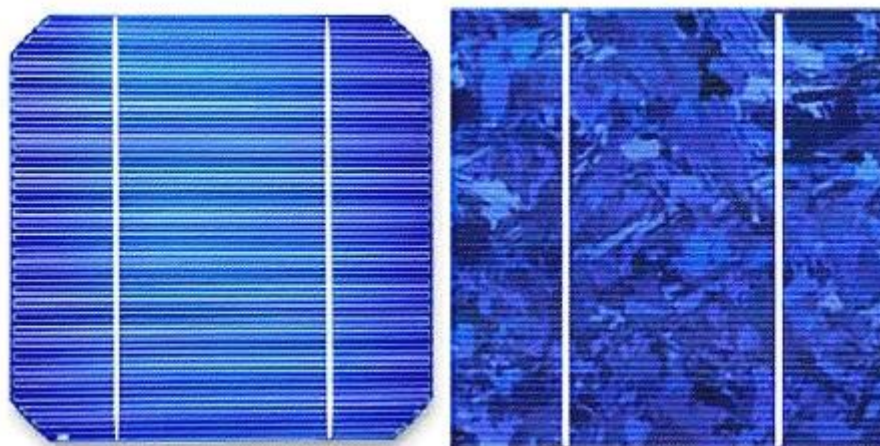
pequena quantidade de energia, esse elétron se desprende da estrutura e entra na banda de condução. Tem-se uma dopagem do tipo n, que consiste na inserção de um elemento doador de elétrons, o fósforo, no caso. De forma semelhante, adiciona-se ao silício átomos que possuem 3 elétrons em sua camada de valência, o boro, por exemplo. Nesse caso, 3 elétrons do boro se ligaram a 3 átomos de silício, faltando um elétron para que o boro atinja a estabilidade, resultando em uma lacuna. Dessa forma, com uma pequena quantidade de energia um elétron vizinho pode ocupar essa posição, resultando em outra lacuna. O boro é considerado, então, um material dopante do tipo p, que aceita elétrons. Colocando-se em contato o silício do tipo n com o do tipo p, os elétrons livres do tipo n vão em direção às lacunas do tipo p. Assim, a camada tipo n cede elétrons e fica carregada positivamente e a do tipo p recebe elétrons, ficando carregada negativamente, originando-se um campo elétrico entre elas, impedindo que mais elétrons se desloquem de n para p. Com essa estrutura, pode-se produzir o efeito fotovoltaico. Com a incidência de luz sobre o tipo p, se os elétrons ganharem energia suficiente, eles entram na banda de condução e, graças ao campo elétrico existente, eles se deslocam para a camada n. Com isso, ficam criadas as condições necessárias para corrente elétrica, basta que se coloque contatos elétricos nas extremidades do material (SEVERINO, 2008; SHAYANI, 2006).

2.4.3 TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

Atualmente, as células fotovoltaicas, em sua maioria, têm sua composição baseada no Si, podendo ser constituídas de silício cristalino e amorfo. Nenhuma dessas tecnologias para placas fotovoltaicas possui um rendimento consideravelmente alto, porém, existe uma diferença entre o aproveitamento energético de cada uma delas, o que se reflete no custo das mesmas. Sendo assim, a melhoria da eficiência energética dessas células, acompanhada de uma redução de custos que viabilizem a inserção cada vez maior dessa tecnologia na sociedade, representa um bom objeto de estudos.

As células de silício cristalino estão entre as mais utilizadas no mercado mundial, consolidando-se pela sua confiabilidade. Consistem de uma lâmina, onde é formada uma junção PN, com capacidade de produzir eletricidade a partir de uma fonte luminosa. Dentre as tecnologias mais utilizadas na fabricação de painéis fotovoltaicos, o silício cristalino é a que possui maior rendimento, de até 20,40%, em laboratório, e 19% na indústria (IEA-PVPS, 2012). Com isso, possui um custo mais elevado, tornando-se pouco competitivo com o sistema tradicional de geração de energia elétrica. Existem os silícios monocristalinos e policristalinos, os primeiros possuem um grau de pureza extremamente alto, possuindo uma

fabricação mais complexa e sendo mais caros, os policristalinos possuem um modo mais simples de fabricação sendo mais baratos, sendo mais encontrados no mercado, a Figura 2.2 apresenta uma imagem com das duas estruturas de silício citadas.

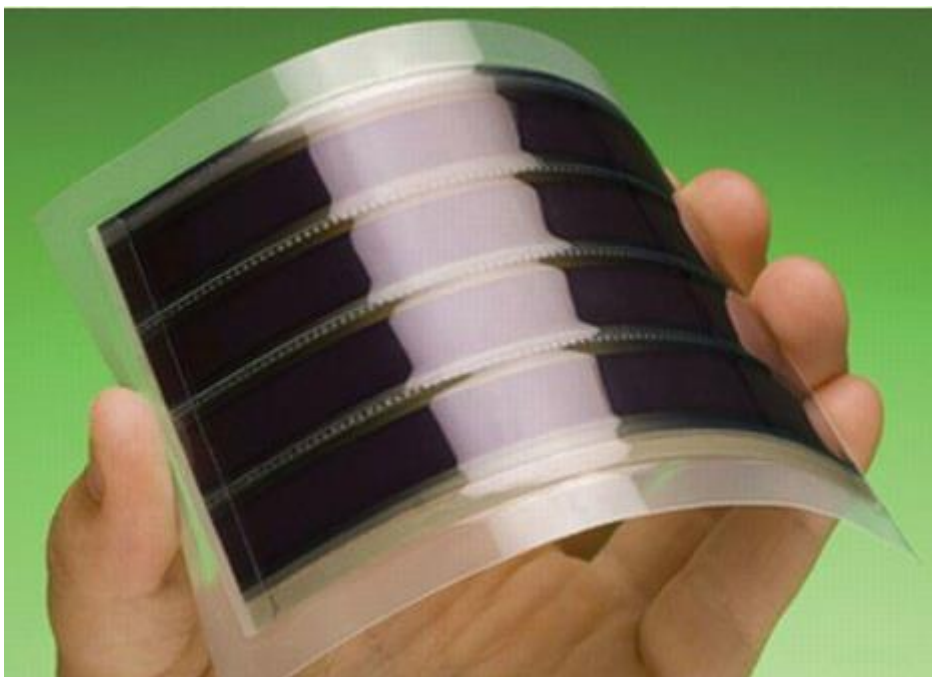


Fonte: Disponível em:

<http://www.newhome.com.br/htmls/ekohome/Solar/Fotovoltaico/Cristalino/primeiros_passos_ger_fotovolt.htm#>.

Figura 2.2 *Silício monocristalino e silício policristalino.*

Os filmes finos representam uma tecnologia mais recente, possuindo células fabricadas a partir da deposição de camadas finas de matérias sobre uma base, que pode ser rígida ou flexível. Essa forma de produção permite que tais filmes possuam uma boa flexibilidade, sendo muito bem vistos para aplicações arquitetônicas e muito utilizados em produtos de baixo consumo, como calculadoras e relógios (ANDRADE, 2013). As células de silício amorfo, única tecnologia fotovoltaica em filmes finos comercialmente viáveis, diferem-se das de silício cristalino por apresentarem uma estrutura com alta desorganização entre os átomos. Possuem, dessa forma, baixa eficiência na produção de energia comparada a das células cristalinas, precisando de uma maior área para obter-se uma mesma potência. O fato de não possuírem uma estrutura cristalina faz com que o silício amorfo possua defeitos em suas ligações, propiciando maior probabilidade de recombinação de pares elétron-lacuna, o que pode ser minimizado com uma hidrogenação. A maior simplicidade de produção, com gastos menores de energia, torna o silício amorfo uma estrutura com um menor custo, podendo ser mais competitivo no mercado. Outra vantagem do silício amorfo é que o aumento de temperatura, diferentemente das demais estruturas encontradas no mercado, não provoca uma redução na potência gerada, sendo um aspecto muito importante, principalmente em países de clima quente, como o Brasil (SEVERINO, 2008). A Figura 2.4 apresenta um exemplo de silício amorfo.



Fonte: Disponível em:

<http://www.newhome.com.br/htmls/ekohome/Solar/Fotovoltaico/Cristalino/primeiros_passos_ger_fotovolt.htm
#. >.

Figura 2.3 *Silício amorfo*.

2.5 ENERGIA EÓLICA

2.5.1 ASPECTOS GERAIS

A energia eólica é gerada a partir das forças dos ventos, sendo abundante, limpa, renovável e disponível em muitos lugares. Essa energia é gerada a partir da captação da força dos ventos, por meio de hélices, movimentando uma turbina que aciona um gerador elétrico. A energia a ser aproveitada depende da área coberta pela rotação das hélices, da densidade do ar e da velocidade do vento. O conhecimento a respeito do potencial eólico de uma região não é simples, depende de um estudo detalhado do comportamento dos ventos, obtendo dados de velocidade e direção do vento.

Existem alguns requisitos para que a energia eólica de um local seja considerada tecnicamente aproveitável, tais como: densidade de potencia do ar maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 metros, com uma velocidade mínima do vento de 7 m/s. De acordo com a Organização Mundial de Meteorologia, essa velocidade mínima do vento só é alcançada em 13% da superfície terrestre (MMA, ?).

O Brasil possui grandes centrais eólicas que possuem potencial que atende o Sistema Interligado Nacional (SIN). Existem também pequenas centrais destinadas ao fornecimento de eletricidade a comunidades isoladas, onde não existe viabilidade para o fornecimento por meio do sistema tradicional, contribuindo para universalização do atendimento de energia elétrica. De acordo com a Aneel, o Brasil possui 2,33 GW de energia eólica instalados, tendo um potencial bruto de 143,5 GW, o que mostra que a energia eólica é uma boa alternativa para geração elétrica brasileira (ANEEL, 2014).

2.5.2 TURBINAS EÓLICAS

As turbinas eólicas são as responsáveis pela conversão da energia oriunda dos ventos em energia elétrica, em um processo realizado por meio de um gerador acoplado ao eixo do rotor da turbina. Esse rotor fornece a energia mecânica para que haja a conversão de energia no gerador (PEREIRA, 2013).

Existem vários tipos de turbinas eólicas disponíveis no mercado, sendo o mais comum classifica-las de acordo com seu eixo, podendo ser turbina de eixo vertical ou horizontal. A mais encontrada no mundo é a turbina eólica de eixo horizontal, com 3 pás (PEREIRA, 2013).

Dentre as vantagens das turbinas de eixo vertical estão (PUCRS, ?):

- capacidade de captar os ventos em todas as direções, não necessitando de sistemas de direção das pás de fluxo principal;
- os geradores, sistemas de freios e sistemas de engrenagem ficam ao nível do solo, facilitando a manutenção; e
- as pás são fixas nos dois extremos do eixo, reduzindo esforço estrutural.

Dentre as desvantagens das turbinas de eixo vertical estão (PUCRS, ?; PEREIRA, 2013):

- precisam de um sistema de partida para acionamento em baixas velocidades;
- possuem menor rendimento comparado ao das turbinas de eixo horizontal e
- as pás ficam muito próximas ao solo, local onde o vento possui uma menor intensidade.

2.5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do que foi apresentado no capítulo, tem-se a fundamentação teórica necessária para a continuidade do trabalho. A sequência dos temas abordados define a ligação existente entre eles. Inicialmente, foi visto como se encontra o sistema energético e, especificamente, o elétrico no Brasil e no mundo, ficando evidentes os problemas encontrados e os desafios para o futuro.

Como resolução para parte desses problemas surge o tema de GD, uma nova forma de pensar na geração de energia elétrica, que modificará a organização de todo o sistema. Percebe-se a dificuldade de implementar e tornar viável tal forma de geração, havendo necessidade de mudanças tecnológicas, sociais, políticas e econômicas. Por fim, trata-se de duas fontes de geração elétrica que podem ser utilizadas na GD, a solar e a eólica.

Fica claro que a disponibilidade de energia solar é grande no planeta, mas que é preciso de um avanço tecnológico para aproveitá-la da melhor maneira possível. Definem-se também os tipos de placas fotovoltaicas existentes com algumas características de cada uma e suas vantagens e desvantagens.

A energia eólica é apresentada como uma boa alternativa para suprir com as necessidades de energia elétrica no mundo. Verifica-se que o vento está presente em todo lugar, mas nem todos com capacidade para serem considerados tecnicamente aproveitáveis para geração elétrica. Com isso, é importante que os locais que têm condições para tal investimento sejam aproveitados.

Considerando que o trabalho tem como objetivo a análise do funcionamento do sistema elétrico da Embaixada da Itália no Brasil, que possui geradores fotovoltaicos e geradores eólicos ligados ao sistema elétrico de distribuição da Companhia Energética de Brasília (CEB), tem-se as condições necessárias para sequência do tema, apresentando-se o sistema com seus materiais, e os métodos de estudo do caso e, posteriormente, os resultados encontrados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise técnica a respeito do sistema de geração fotovoltaica (SGFV) e do sistema de geração eólica (SGE) da Embaixada da Itália no Brasil, que fazem parte do projeto conhecido como Embaixada Verde. Trata-se de um programa com intenção de incentivar o desenvolvimento eco-sustentável, que, além dos sistemas de geração distribuída conectados à rede, também conta com uma planta de fitodepuração e reuso de água.

Considerando que, no capítulo anterior, já foram expostos todos os conceitos necessários para o desenvolvimento do trabalho, este capítulo destina-se a apresentar os materiais necessários para as análises do projeto; tais como os equipamentos que compõem os sistemas de geração distribuída, os equipamentos de medição utilizados e as ferramentas computacionais; e a metodologia que será utilizada para se chegar aos resultados que serão apresentados no próximo capítulo. Uma das etapas da metodologia é a descrição do planejamento de medições práticas que seriam realizadas nos sistemas da embaixada, mas que não ocorreram devido ao modo em que o sistema foi projetado.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 SGFV DA EMBAIXADA DA ITÁLIA

3.2.1.1 ASPECTOS GERAIS



Fonte: Google Mapas. Disponível em <www.maps.google.com.br>. Acesso em 17 de fevereiro de 2014.

Figura 3.1 – SGFV da Embaixada italiana no Brasil.

O SGFV é composto por 405 painéis fotovoltaicos, 9 inversores, um quadro de controle geral CC - corrente alternada (CA) (QCG) com 9 medidores, um para cada inversor, dispositivos de proteção e cabeamento. A Figura 3.1 apresenta uma vista de cima da Embaixada, podendo ser observada a disposição dos painéis fotovoltaicos.

O funcionamento do sistema dá-se da seguinte forma: Nos painéis ocorre a conversão da energia oriunda da irradiação solar em energia elétrica. Esses painéis estão divididos em 9 conjuntos, cada um contendo 45 painéis. Cada conjunto possui 5 arranjos em paralelo, cada arranjo com 9 painéis em série.

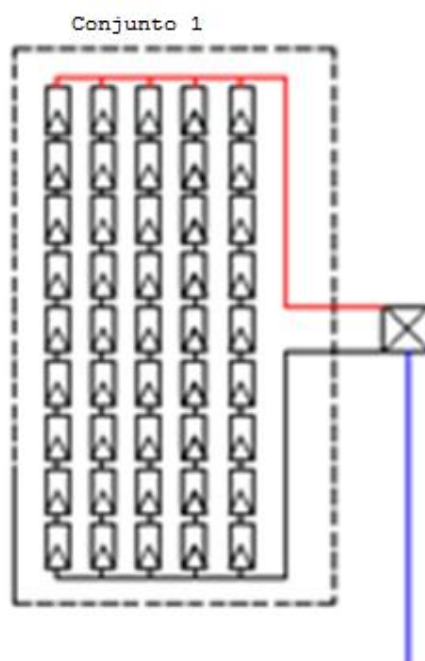
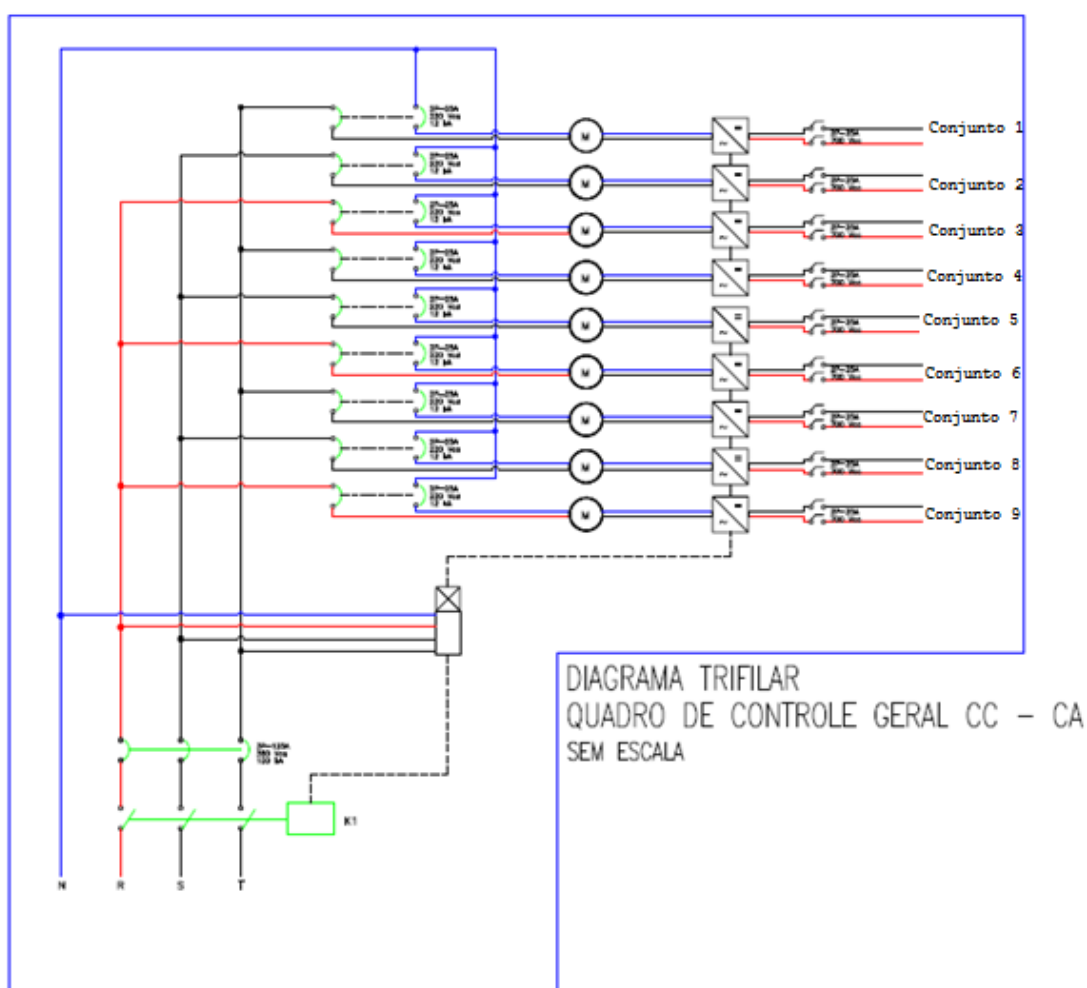


Figura 3.2 – *Conjunto de painéis fotovoltaicos.*

A saída de cada conjunto é conectada a uma caixa de junção e de lá vão ao QCG. O cabeamento que sai de cada caixa de junção é conectado a uma chave seccionadora, localizada no QCG, saindo dela para um inversor. Os nove inversores convertem a energia gerada pelos conjuntos de painéis de CC para CA. Como a CA será ligada ao barramento da rede, ela precisa sair dos inversores em paralelismo com a energia da concessionária, CEB. Esse paralelismo é realizado pelos inversores, por meio de um contator e de um relé de proteção, que também se encontra no QCG. Em uma extremidade do contator estão conectadas as três fases da CEB e, na outra, as três fases provenientes do SGFV. A energia convertida nos inversores retorna ao QCG por meio de cabeamento, em seguida, a corrente de cada inversor passa por um medidor, totalizando nove medidores, depois passam em nove disjuntores monofásicos, um para cada inversor, para ser distribuída nas três fases por meio de

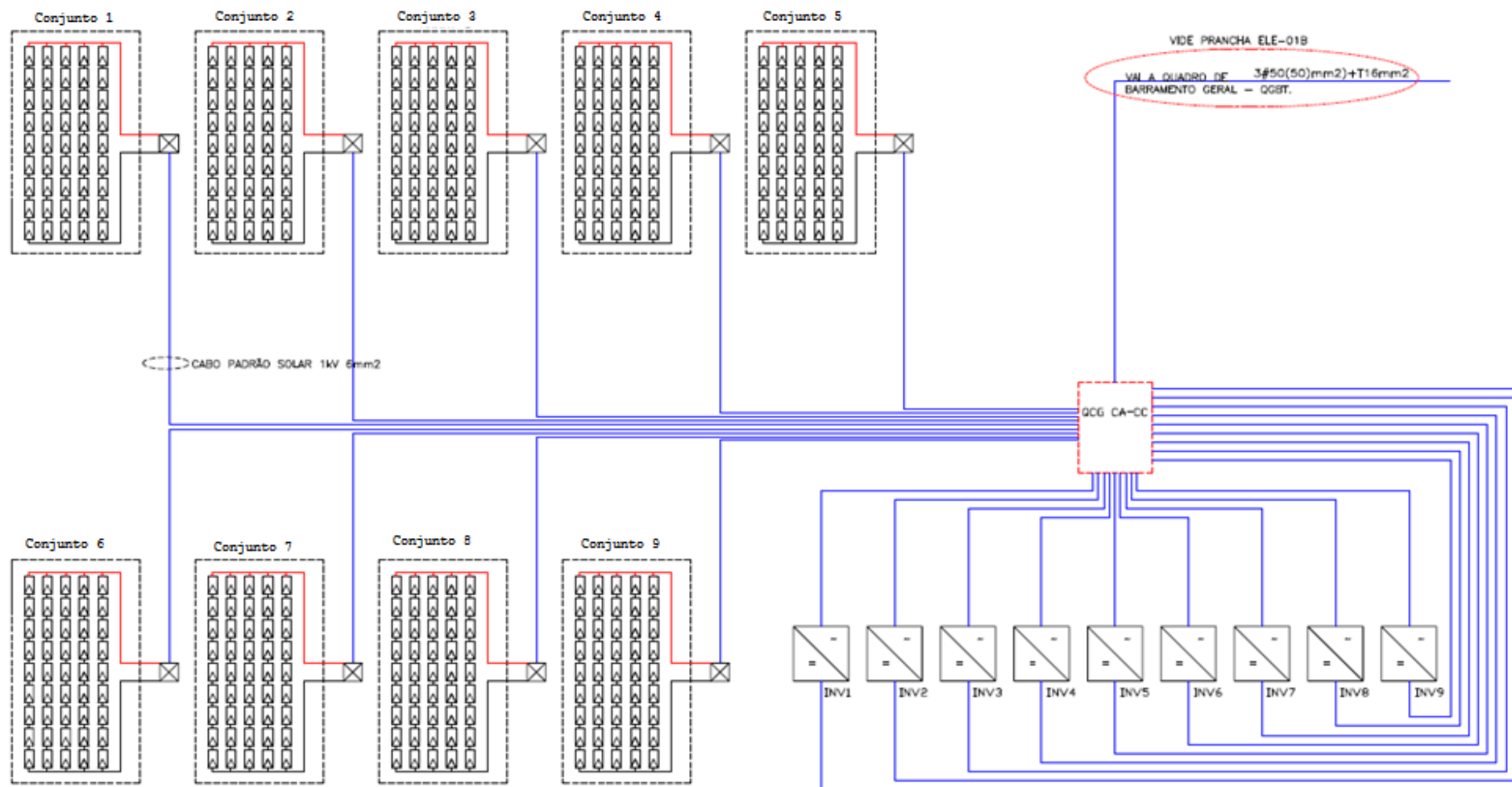
barramento, três inversores em cada fase. Antes de as três fases serem conectadas ao contator elas passam por um disjuntor trifásico. Ademais, há um relé de proteção responsável por acionar o contador, fazendo com que o circuito seja aberto, ocorrendo a desenergização das fases, no caso de falta e inversão de fases, além de sub e sobretensão, fazendo com que os inversores interrompam o fornecimento de energia dos sistemas. A corrente elétrica sai do QCG e vai ao quadro geral (QG), por meio de cabeamento, onde existe um barramento em que se conecta o SGFV, o SGE e a CEB.

A conexão do SGFV da Embaixada ao barramento da CEB é uma característica que agrega muito valor ao mesmo, uma vez que se pode aproveitar toda a energia gerada pelo sistema. Em caso de essa energia ser superior à carga da Embaixada, ela é aproveitada pela concessionária, sendo adicionada como compensação para a Embaixada na conta de energia elétrica. As Figuras 3.2 e 3.3 mostram diagramas unifilares do sistema, podendo ser observada a disposição dos elementos que foram descritos.



Fonte: Diagrama unifilar sistema de energia solar fotovoltaica – Embaixada da Itália (Santos, 2011).

Figura 3.3 – QCG e planta de distribuição trifásica.



Fonte: Diagrama unifilar sistema de energia solar fotovoltaica – Embaixada da Itália (Santos, 2011).

Figura 3.4 – Diagrama unifilar do SGFV.

A Figura 3.2 apresenta mais detalhadamente os dispositivos de proteção, além de mostrar a distribuição da energia que vem dos inversores nas 3 fases, aparecendo também o contator com sua ligação aos inversores realizando o paralelismo do sistema com o barramento.

A Figura 3.3 dá uma visão geral dos painéis com suas respectivas caixas de junção de onde partem os cabos que chegam ao quadro geral e vão para os inversores, retornando e sendo conectados ao barramento da rede.



Figura 3.5 – QCG.

Na figura 3.4, pode ser observado o QCG, com os elementos já descritos e apresentados no diagrama unifilar.

3.2.1.2 OS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os painéis utilizados no SGFV são da marca Sharp, do tipo filme fino, compostos por silício amorfo e microcristalinos, modelo NA-F121G5. A potência de pico de cada painel é de 121 Wp, totalizando 49 kWp, considerando os 405 painéis. A tensão para o ponto de máxima potência é de 45 V, com uma corrente contínua de 2,69 A. Assim, a tensão de cada conjunto

para potência de pico é de 405 V. De acordo com o catálogo dos equipamentos, existi uma variação no valor de potência máxima de +10% a -5%, modificando, consequentemente, os valores de tensão e corrente apresentados. A eficiência máxima dos módulos fotovoltaicos é de 8,51%. Cada painel possui uma área de 1,42 m², 1,409 m de comprimento por 1,009 m de largura. A disposição dos conjuntos de painéis fotovoltaicos que se encontram na Embaixada pode ser observada na Figura 3.5.



Figura 3.6 – Painéis fotovoltaicos do SGFV da Embaixada da Itália.

3.2.1.3 INVERSORES

Os inversores utilizados no SGFV são da marca Santerno, modelo SUNWAYTM M PLUS 6400. O valor de potência máxima de entrada dos inversores é de 5880 Wp, com uma potência máxima de saída de 5390 W. A máxima eficiência prevista é de 97%. A frequência de saída pode ser ajustada nos valores de 50 Hz ou 60 Hz. O valor de tensão máxima CC é de 600 V. O valor de tensão de saída nominal é de 230 V. Com base nesses dados, verifica-se que o modelo de inversor utilizado atende as necessidades do sistema, considerando que os valores de entrada estão de acordo com a energia fornecida pelos conjuntos de painéis fotovoltaicos e os valores de saída estão em uma margem que possibilita o paralelismo com a energia fornecida pela concessionária, podendo, assim, conectar o sistema ao barramento da CEB. A Figura 3.6 apresenta o modelo do inversor descrito.



Figura 3.7 – Inversor.

3.2.2 SGE DA EMBAIXADA DA ITÁLIA

O SGE da Embaixada da Itália é composto por 5 microturbinas, que são da marca Ecomacchine S.P.A, modelo Windbooster 1500. A potência de cada microturbina é de 1,1 kVA, totalizando 5,5 kVA. A tensão nominal de saída das microturbinas é de 230 V. O funcionamento das turbinas em *stand-by* tem um consumo de 10 W.

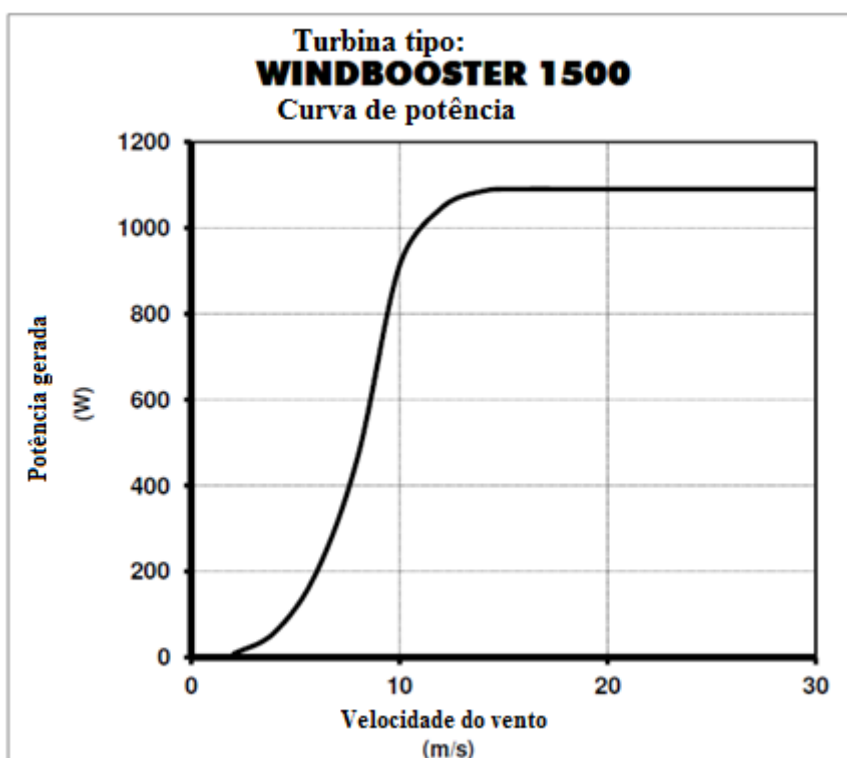


Gráfico 3.1 – Curva da potência gerada em função da velocidade do vento.

O Gráfico 3.1 apresenta a curva dos valores de potência da turbina em função da velocidade do vento. Pode-se observar que a energia elétrica começa a ser gerada com uma velocidade do vento próxima a 1,8 m/s e para velocidades acima de 14 m/s a potência gerada é praticamente constante, com valor próximo a 1,1 kW.

As microturbinas foram montadas com uma estrutura que favorece o aproveitamento do vento vindo de qualquer direção, melhorando o desempenho do sistema.

Atualmente, as turbinas da Embaixada não estão conectadas à carga da própria Embaixada nem ao barramento da concessionária, dessa forma, o sistema encontra-se desligado. Porém, para este trabalho, as simulações serão realizadas considerando-se que o sistema eólico está em pleno funcionamento, tendo sua energia gerada ligada ao barramento da CEB.

Cada microturbina é ligada a um inversor da marca Ingecon, modelo Ingecon Wind 2,5 TL. Os inversores possuem uma eficiência máxima de 96,6%, potência de saída máxima igual a 2500 W, tensão de saída igual a 230 V_{CA}, tensão de entrada variando de 50 V_{CC} a 550 V_{CC}. A frequência dos inversores é de 50Hz. A energia que é convertida nos inversores vai ao QCG do sistema eólico, onde será distribuída em 3 fases e então, por meio de cabeamento, é conectada ao QG.

3.2.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

O instrumento utilizado para medição da irradiação solar instantânea foi um piranômetro modelo 8101, fabricado pela empresa Philipp Schenk. O piranômetro foi conectado a um data logger da marca Almemo[®], modelo 2590-9, possibilitando a visualização da irradiação instantânea, o valor de irradiação é dado em W/m², não apresentando nenhuma casa decimal para faixa de valores encontrados.

Para as medições de tensão foi utilizado um multímetro da Minipa, modelo ET-2082C, com capacidade de medir tensões em CC e CA, da ordem de 200 mV a 1000 V. Para medições acima de 200 V, o instrumento não apresenta nenhuma casa decimal.

O instrumento utilizado para medições de corrente foi um amperímetro da Minipa, modelo ET 3960. O medidor obtém os valores RMS das CC e CA, tendo como limite o valor de 2.000 A e precisão de uma casa decimal.

3.2.4 CARGA FIXA

Uma carga fixa de resistores de chuveiro foi feita para ser utilizada nas medições do SGFV. A estrutura dessa carga era composta por dois resistores de 5.500 W e dois resistores de 6.400 W, que foram fixados em uma estrutura de madeira. A conexão da carga com a energia elétrica foi realizada por meio de cabos de 50 mm² e 6 mm², e a modificação da potência da carga foi feita por meio de disjuntores, dois de 70 A e um de 40 A, que também serviram como proteção do sistema. A Figura 3.7 apresenta o esquemático da carga que seria utilizada nas medições.

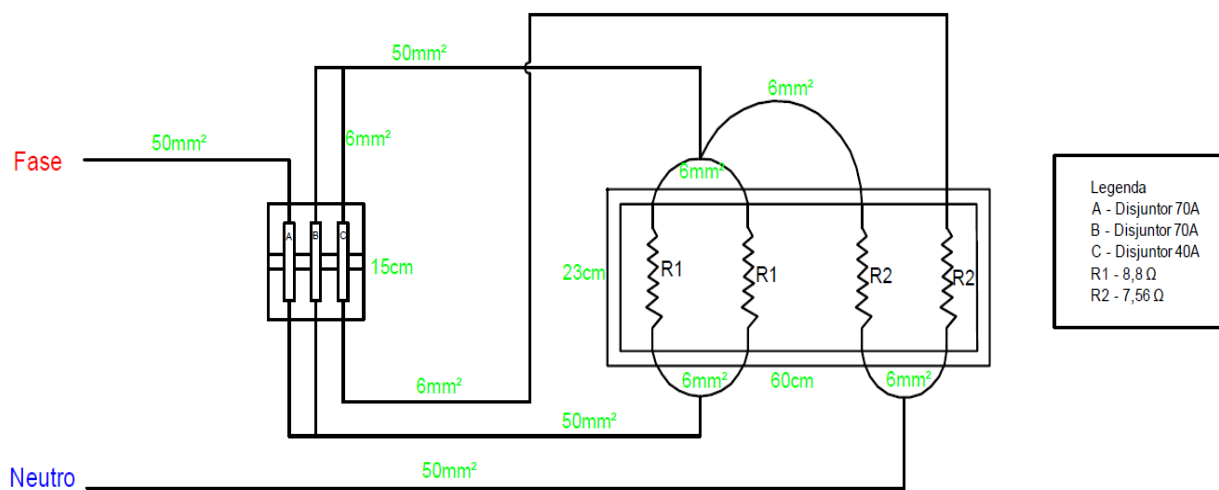


Figura 3.8 – Esquemático de carga fixa para o SGFV.

3.2.5 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

As simulações computacionais foram desenvolvidas utilizando a planilha eletrônica Excel[®]; ferramenta computacional com uma interface intuitiva, com possibilidade de realização de cálculos e construção de gráficos; onde foram realizados todos os cálculos necessários, elaboradas as tabelas e gerados os gráficos deste trabalho.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 MEDIÇÕES

Existia uma proposta inicial de realizarem-se medições práticas nos sistemas de geração da Embaixada, com objetivo de complementar as simulações com os dados coletados nas medições.

O planejamento foi de desconectar a carga da Embaixada do SGFV e conectar cargas fixas, arranjo composto por resistências de chuveiro. A utilização de cargas fixas possibilitaria que houvesse um maior controle sobre o sistema, já que a carga da Embaixada varia constantemente. Dessa forma, existiriam as condições necessárias para se realizar as medições.

O arranjo com os resistores de chuveiro possuía três níveis de carga; alto, médio e baixo; sendo que a carga alta tinha valor próximo ao da potência máxima de uma das três fases do SGFV, aproximadamente 15 kW. A mudança de um nível de carga para outro era dada por meio de disjuntores que compunham a estrutura.

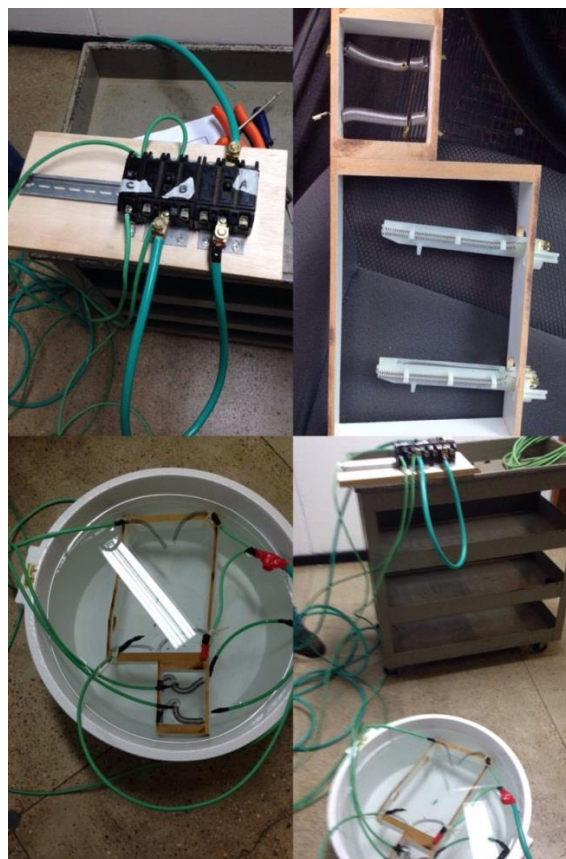


Figura 3.9 – *Teste no SG11 UnB.*

Um teste inicial foi realizado conectando essa carga ao quadro geral do SG11, localizado na Universidade de Brasília (UnB). Verificaram-se os valores de tensão e corrente sobre a carga, calculando-se as potências para cada nível de carga. A Figura 3.9 apresenta o arranjo da carga fixa que foi montada, e testada na UnB.

Durante a medição realizada na Embaixada, sua carga foi desconectada do SGFV no QCG e a carga fixa de resistores de chuveiro foi conectada ao mesmo. Nesse momento, os inversores interromperam seu funcionamento. Foi verificado que existia tensão gerada pelo SGFV antes dos inversores, ainda em sistema de CC, porém essa tensão não estava sendo convertida pelos inversores, não chegando nenhuma potência elétrica à carga conectada. Assim, foi verificado que o SGFV da Embaixada da Itália foi projetado para funcionar em conjunto com a energia da concessionária, o que ficou confirmado ao constatar-se que, quando falta energia da CEB, o funcionamento do SGFV também é interrompido. Essa forma de operação do sistema é controlada por meio do relé de proteção, que se encontra no QCG, que ao perceber a falta de uma fase do contator desligou os inversores. Dessa forma, ao retirar-se a carga da Embaixada, perde-se também essa conexão entre as fases da concessionária e o SGFV, impossibilitando o funcionamento dos inversores.

Esse modo de funcionamento do sistema da Embaixada deve ter sido planejado por questões de segurança, até mesmo no que diz respeito a manutenções realizadas pela concessionária, evitando que haja um fluxo de energia vindo da Embaixada que possa trazer riscos para quem esteja corrigindo um eventual problema que tenha gerado falta de energia elétrica.

Caso tivesse funcionado o planejamento com relação às conexões das cargas fixas, seriam realizadas as medições de tensão e corrente contínuas na saída das caixas de junção de cada conjunto de painéis fotovoltaicos, tensão e CC nas chaves seccionadoras, localizadas no QCG, e tensão e CA nos disjuntores, encontrados também no QCG. Ao mesmo tempo seriam coletados os valores de irradiação solar instantâneos, por meio do piranômetro, na cobertura da Embaixada, onde se encontram os painéis fotovoltaicos. Com isso, poderiam ser calculadas as perdas no cabeamento que vai da caixa de junção ao QCG e as perdas no cabeamento que vai das chaves seccionadoras para os inversores e também de se obter uma faixa de rendimento dos inversores, uma vez que o rendimento máximo fornecido pelo fabricante em condições normais de uso dificilmente é alcançado.

Decidiu-se realizar essas medições com a própria carga da Embaixada. Dessa forma, no mês de fevereiro, foi aguardado um dia com condições climáticas favoráveis, com céu aberto. Então, em um dia com irradiação solar favorável, foram realizadas as medições descritas no

parágrafo anterior, porém os valores encontrados não trouxeram segurança para análise de perdas, uma vez que existe variação constante das condições climáticas, irradiação solar, mesmo considerando um dia com poucas nuvens, e da carga da Embaixada. A Figura 3.8 apresenta imagens das medições realizadas.



Figura 3.10 – Medições realizadas *no SGFV*.

Para o SGE, existia proposta semelhante de medições a serem realizadas, porém constatou-se que o sistema não está funcionando, não estando conectado à carga da Embaixada, o que impossibilitou as medições.

3.3.2 SIMULAÇÕES

3.3.2.1 ASPECTOS GERAIS

Como já abordado no subitem 3.1, a Embaixada possui dois sistemas de GD, o SGFV e o SGE. Foram criados gráficos e tabelas, por meio de planilha eletrônica Excel[®], para avaliar o

comportamento de cada um desses sistemas separadamente, e também um diagrama de blocos com os dois sistemas e a CEB conectados ao QG que alimenta a carga da Embaixada da Itália.

Este subitem presta-se a abordar, detalhadamente, como foram construídas essas planilhas eletrônicas, suas funções e o que se espera obter a partir delas. Da mesma forma, será explicado o fluxo de energia a partir das fontes primárias de energia, nesse caso a irradiação solar e a velocidade dos ventos, até o QG da Embaixada. Conjuntamente serão apresentadas premissas adotadas durante esse processo. Primeiramente, serão abordadas as planilhas ligadas ao SGFV, posteriormente, as ligadas ao SGE e, por fim, as ligadas ao diagrama de blocos que consolida as informações mais relevantes.

3.3.2.2 SIMULAÇÃO DO SGFV

Para simular o SGFV, deve-se compreender, primeiramente, o fluxo de energia desse sistema. A energia proveniente da irradiação solar é convertida em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos. A energia elétrica gerada nos módulos fotovoltaicos passa por cabos até chegar aos inversores, onde a energia é convertida de CC para CA. A energia elétrica convertida nos inversores vai ao QG por meio de cabeamento. A energia que chega ao QG vai para a carga da Embaixada e, caso seja superior à demandada pela mesma, o seu excesso é fornecido à concessionária, gerando um bônus energético para Embaixada.

O primeiro passo é ter os dados de irradiação solar. Essas informações foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estação automática de monitoramento do INMET mais próxima da Embaixada da Itália é a de Brasília – DF, cerca de 11 km. Portanto, decidiu-se utilizar as informações coletadas por essa estação, disponíveis em INMET (2014), sem nenhum tratamento e incluindo eventuais incoerências previstas pela fonte. O INMET só fornece os dados de irradiação solar dos últimos 90 dias, considerados suficientes para o estudo. Assim, esse foi o período utilizado para a análise do SGFV separando com os meses respectivos.

Os dados utilizados foram “Data”, “Hora (UTC)”, “Temperatura (°C) Inst., Máx. e Mín.” e “Irradiação (kJ/m²)”. Os dados do INMET usam como separador de casa decimal o ponto (.), mas para análise correta dos dados no Excel®, configurado com a linguagem padrão português do Brasil, deve-se utilizar como separador de casas decimais a vírgula (,). Então, deve-se substituir o separador de todos os números através da ferramenta “Localizar tudo” e “Substituir tudo”.

A unidade para irradiação solar adotada pelo fabricante dos módulos fotovoltaicos é Wh/m², assim sendo, foi preciso converter a unidade da irradiação disponibilizada pelo INMET. Para tal foi utilizada a conversão:

$$1 \text{ kJ} = 2,7778 \times 10^{-1} \text{ Wh} \quad (3.1)$$

Em que:

kJ é a unidade de medida de energia;

Wh é a unidade de medida de energia.

Após essa conversão, pode-se calcular a temperatura de operação das células fotovoltaicas dos módulos pela seguinte equação (MESSENGER e VENTRE,2000; LORENZO et al., 1994).

$$T_{cel} = T_a + G \times \frac{(NOCT-20)}{800} \quad (3.2)$$

Em que:

T_{cel} é a temperatura de operação nas células fotovoltaicas, em °C;

T_a é a temperatura ambiente considerada, em °C;

G é a irradiação solar considerada, em W/m²;

$NOCT$ é a temperatura nominal de operação das células, em °C.

$NOCT$ é a sigla inglesa para *nominal operating cell temperature*, que é a temperatura que a célula fotovoltaica alcançará quando operar em vazio em temperatura ambiente de 20 °C e com irradiação solar de 800 W/m², Am 1,5 e velocidade do vento inferior a 1m/s (SEVERINO, 2008).

Adotou-se a premissa que todos os equipamentos utilizados, como: módulos fotovoltaicos, inversores, cabos, etc., possuem as mesmas características descritas pelo fabricante. Sendo assim, todos os módulos são iguais, geram a mesma quantidade de potência sob as mesmas condições climáticas, todos os inversores são iguais e todos os cabos possuem a mesma resistência, em Ω/km , e todos os cabos que ligam os módulos aos inversores possuem o mesmo comprimento, assim como, todos os cabos que conectam os inversores às fases possuem o mesmo comprimento.

A seguir foi calculada a potência gerada por um sistema fotovoltaico. Neste caso, foi considerado como sistema um dos nove conjuntos de módulos fotovoltaicos descritos no

subitem 3.2.1.1, pela seguinte equação (MESSENGER e VENTRE,2000; LORENZO et al., 1994).

$$P_{sist} = N \times \frac{G}{1.000} \times [P_{max} + \mu_p \times (T_{cel} - 25)] \quad (3.3)$$

Em que:

P_{sist} é a potência gerada pelo conjunto de módulos fotovoltaicos, em W;

N é o número de módulos do conjunto;

G é a irradiação solar considerada, em W/m²;

P_{max} é a máxima potência gerada por módulo sob CPT: irradiação solar de 1.000 W/m², AM 1,5 e temperatura de células de 25°C;

μ_p é o coeficiente de variação da potência máxima com a temperatura, em W/°C;

T_{cel} é a temperatura de operação nas células fotovoltaicas, em °C;

Para os painéis fotovoltaicos instalados na Embaixada da Itália, segundo SHARP, $NOCT = 44\text{ }^{\circ}C$, $P_{max} = 121\text{ W}$ e $\mu_p = -290,4\text{ mW}/^{\circ}C$. Como descrito no subitem 3.2.1.1 cada conjunto de módulos fotovoltaicos possui $N = 45$ módulos.

Seguidamente foi calculada a potência na entrada do inversor, ou seja, a potência gerada pelo conjunto de módulos fotovoltaicos menos as perdas nos cabos. O cabo que liga os módulos aos inversores é o cabo padrão solar 1 kV e 6 mm², ver Figura 3.4, que possui resistência igual a 3,39 Ω/km. Foi analisada a planta da Embaixada, juntamente com o eletricitista responsável pela Embaixada, e foi estimada a distância entre os painéis e os inversores em 75 m. Logo, a resistência do cabeamento é 0,2543 Ω. A corrente que passa pelo cabo é dada por:

$$I = \frac{P_{sist}}{V_{sist}} \quad (3.4)$$

Em que:

I é a corrente que sai de um conjunto de módulos fotovoltaicos e vai para os inversores, em A;

P_{sist} é a potência gerada por um conjunto de módulos fotovoltaicos, em W;

V_{sist} é a tensão do conjunto de módulos fotovoltaicos, em V.

Foi adotada a premissa que independente se a potência gerada pelos módulos seja inferior à potência máxima de 121 W a tensão dos módulos será fixa e igual à tensão máxima fornecida pelo fabricante, ou seja, 45 V, logo, se a potência gerada variar, como a tensão é fixa, somente a corrente sofrerá alterações. Consequentemente a tensão do conjunto de módulos fotovoltaicos será de 405 V. Então a potência na entrada do inversor será dada pela equação:

$$P_{in} = P_{sist} - (I^2 \times R_{cabo}) \quad (3.5)$$

Em que:

P_{in} é a potência na entrada do inversor, em W;

P_{sist} é a potência gerada por um conjunto de módulos fotovoltaicos, em W;

I é a corrente que sai dos módulos fotovoltaicos e vai para os inversores, em A;

R_{cabo} é a resistência do cabo que liga os módulos fotovoltaicos aos inversores, em Ω .

Como já dito acima $R_{cabo} = 0,2543 \Omega$.

Depois de calculada a potência na entrada do inversor, foi considerado o rendimento máximo do inversor fornecido pelo fabricante, detalhado no subitem 3.2.1.3, de 97% para obter a potência na saída do inversor, que é dada pela equação:

$$P_{out} = P_{in} * 97\% \quad (3.6)$$

Em que:

P_{out} é a potência na saída do inversor, em W;

P_{in} é a potência na entrada do inversor, em W.

Após essa etapa, foi calculada a potência total em uma das fases, que é a soma da potência na saída de três inversores subtraindo as perdas nos cabos que ligam os inversores ao QCG. O comprimento médio estimado pelo eletricitista responsável pela Embaixada foi de 10 m, multiplicando pela resistência do cabo por comprimento de cabo, que é de $3,39 \Omega/km$, tem-se que a resistência nesse cabeamento é de $0,0339 \Omega$. A corrente que passa por esse cabeamento é dada pela equação:

$$I_2 = \frac{P_{out}}{V_{inv}} \quad (3.7)$$

Em que:

I_2 é a corrente que vai dos inversores para o QCG, em A;

P_{out} é a potência na saída do inversor, em W;

V_{inv} é a tensão na saída do inversor, em V.

Como apresentado no subitem 3.2.1.3 a tensão de saída nominal do inversor é de 230 V segundo o fabricante. Mesmo que no cenário real a tensão de saída do inversor acompanhe a tensão fornecida pela CEB, devido ao paralelismo, para fins de simulação adotou-se como premissa que a tensão fornecida pela CEB será constante e igual à tensão de saída nominal do inversor em todo o tempo. Logo, $V_{inv} = 230 \text{ V}$.

Portanto, a potência total em uma das fases é dada pela seguinte equação:

$$P_{fase} = \frac{3 * [P_{out} - (I_2^2 * R_{cabo 2})]}{1.000} \quad (3.8)$$

Em que:

P_{fase} é a potência em uma das três fases, em kW;

P_{out} é a potência na saída do inversor, em W;

I_2 é a corrente que vai dos inversores para o QCG, em A;

$R_{cabo 2}$ é a resistência do cabo que liga a saída dos inversores a uma das fases, em Ω .

Como já calculado anteriormente, $R_{cabo 2} = 0,0339\Omega$.

Os dados de irradiação fornecidos pelo INMET são espaçados de hora em hora, portanto a potência coincide com a energia gerada naquela hora, se o tempo for igual a 1 hora a energia, consequentemente, será igual a potência, em Wh.

Sabendo disso a energia total gerada, considerando-se as três fases, foi calculada da seguinte maneira: para a primeira hora analisada a energia foi dada pela equação:

$$E_1 = 3 * P_{fase} \quad (3.9)$$

Em que:

E_1 é a energia total gerada nas três fases na primeira hora da análise, em kWh;

P_{fase} é a potência em uma das três fases, em kW;

Como foi adotada a premissa de que todos os equipamentos são iguais, a potência nas três fases é a mesma, logo a energia gerada na primeira hora da análise é simplesmente dada pela equação 3.9. A partir da segunda hora a energia é calculada diferente, pois será analisada a energia produzida ao longo daquele mês, então a energia será calculada pela equação:

$$E_{n+1} = 3 * P_{fase} + E_n \quad (3.10)$$

Analisando-se a Equação 3.10 percebe-se que a energia, em uma dada hora, será três vezes a potência gerada em uma das fases, naquela mesma hora, somada a energia total gerada na hora anterior. Assim sendo, ao final da planilha é obtida a energia acumulada total gerada naquele mês.

No final da planilha foi calculada a irradiação média por hora em (kWh/m²)/h, considerando-se todas as horas analisadas; a irradiação média por dia em (kWh/m²)/dia, multiplicando a irradiação média por hora por 24 horas; a irradiação média por mês em (kWh/m²)/mês, multiplicando a irradiação média por hora pela quantidade de dias do mês de referência. Além disso, é calculada a potência média na saída do módulo, na entrada do inversor, na saída do inversor e em uma das fases. E a energia total gerada acumulada no mês avaliado, que é igual à energia na última hora avaliada.

Conclui-se que, a partir das fórmulas e premissas adotadas nesse subitem, se tem condições de compreender todo o fluxo de energia no SGFV, desde a fonte primária até a energia gerada nas três fases durante o tempo de avaliação.

3.3.2.3 SIMULAÇÃO DO SGE

Da mesma forma como no SGFV, inicialmente, deve-se compreender o fluxo de energia do SGE. A partir de certa velocidade dos ventos as microturbinas eólicas começam a converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica. Além da velocidade dos ventos, as microturbinas eólicas dependem da direção dos ventos, da densidade, entre outros fatores. Para essa análise foi adotada a premissa que os geradores eólicos dependem somente da velocidade dos ventos. A energia elétrica gerada nas microturbinas eólicas passa por cabos até

chegar aos inversores, onde a frequência é ajustada para 60 Hz. A energia elétrica convertida em CA pelos inversores, nas condições necessárias para conexão com a carga da Embaixada e o barramento que vai à concessionária, segue em direção ao QG por meio de cabeamento. A energia que chega ao QG vai para a carga da Embaixada e, caso seja superior à demandada pela mesma, o seu excesso é fornecido à concessionária, gerando um bônus energético para Embaixada.

Primeiramente, é preciso ter-se os dados de vento. As informações a respeito desses dados foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Utilizou-se a mesma estação automática de monitoramento do INMET, de Brasília – DF. Assim como nos dados de irradiação, o INMET só fornece os dados de ventos dos últimos 90 dias. Portanto, foi utilizado esse período para a análise do SGE separando-se os dias nos meses respectivos.

Os dados utilizados foram “Data”, “Hora (UTC)”, “Vento (m/s) Vel.”. Adotou-se a mesma premissa que todos os equipamentos utilizados, como: microturbinas, inversores, cabos, etc., possuem as mesmas características descritas pelo fabricante. Nas mesmas condições que no caso do fotovoltaico.

Para o cálculo da potência gerada por uma microturbina eólica foi utilizada a curva de potência gerada em função da velocidade do vento, exibida no gráfico 3.1, fornecida pelo fabricante. Por se tratar de uma curva complexa, e a equação não ter sido fornecida no catálogo do gerador, escolheu-se sete pontos da reta e aproximou-se a curva a seis retas. Os pontos escolhidos são: A (1,8; 0), B (6; 200), C (7,6; 400), D (9,6; 800), E (10; 930); F (11; 1000), G (14; 1100). As retas foram traçadas entre dois pontos, e são elas: \overline{AB} , \overline{BC} , \overline{CD} , \overline{DE} , \overline{EF} , \overline{FG} , e \overline{H} , para todo vento acima de 14 m/s será produzido 1100 W. Para o cálculo das retas foi utilizada a equação fundamental da reta:

$$m = \frac{y - y_a}{x - x_a} \rightarrow y - y_a = m(x - x_a) \quad (3.11)$$

Em que:

m é o coeficiente angular da reta;

y e x são pertencentes do mesmo ponto da reta;

y_a e x_a são pertencentes do mesmo ponto da reta, contudo diferente do ponto (x, y) .

Utilizando a equação 3.11, foi calculada a equação das retas a seguir:

$$\bar{A} \rightarrow \forall v \leq 1,8 \rightarrow Peol = 0;$$

$$\overline{AB} \rightarrow \forall 1,8 \leq v \leq 6 \rightarrow Peol = 47,62(v - 1,8);$$

$$\overline{BC} \rightarrow \forall 6 < v \leq 7,6 \rightarrow Peol = 200 + 125(v - 6);$$

$$\overline{CD} \rightarrow \forall 7,6 < v \leq 9,6 \rightarrow Peol = 400 - 200(v - 7,6);$$

$$\overline{DE} \rightarrow \forall 9,6 < v \leq 10 \rightarrow Peol = 800 + 325(v - 9,6);$$

$$\overline{EF} \rightarrow \forall 10 < v \leq 11 \rightarrow Peol = 930 + 70(v - 10);$$

$$\overline{FG} \rightarrow \forall 11 < v \leq 14 \rightarrow Peol = 1.000 + 33,33(v - 11);$$

$$\bar{H} \rightarrow \forall v > 14 \rightarrow Peol = 1.100.$$

Em que:

P_{eol} é a potência gerada por uma microturbina eólica, em W;

v é a velocidade do vento, em m/s;

Então, cada velocidade do vento produziria uma quantidade de Watts dada pelas equações das retas dependendo de qual faixa de velocidade do vento o dado fosse condicionado. Por exemplo: se a velocidade fosse de 7 m/s esse dado seria jogado na equação da reta \overline{BC} e produziria 375 W.

Em seguida foi calculada a potência na entrada do inversor, ou seja, a potência gerada pelo gerador eólico menos as perdas nos cabos. As perdas foram calculadas da mesma forma que no SGFV, a única diferença é o tamanho do cabo, que foi estimado pelo eletricitista responsável pela Embaixada em 30 m. Logo, uma vez que o cabo possui resistência igual a $3,39 \Omega/km$, a resistência do cabeamento é $0,1017 \Omega$. A corrente que passa pelo cabo é dada por:

$$I_{eol} = \frac{P_{eol}}{V_{eol}} \quad (3.12)$$

Em que:

I_{eol} é a corrente que sai da microturbina eólica e vai para os inversores, em A;

P_{eol} é a potência gerada por uma microturbina eólica, em W;

V_{eol} é a tensão nominal da microturbina eólica, em V.

De acordo com o fabricante, e com o que foi detalhado no subitem 3.2.2, a tensão nominal na saída da microturbina eólica é de 230 V. Então a potência na entrada do inversor será dada pela equação:

$$P_{in-eol} = P_{eol} - (I^2 \times R_{cabo3}) \quad (3.13)$$

Em que:

P_{in-eol} é a potência na entrada do inversor, em W;

P_{eol} é a potência gerada por uma microturbina eólica, em W;

I_{eol} é a corrente que sai das microturbinas eólicas e vai para os inversores, em A;

R_{cabo3} é a resistência do cabo que liga as microturbinas eólicas aos inversores, em Ω .

Como já mencionado anteriormente, $R_{cabo3} = 0,1017 \Omega$.

Depois de calculada a potência na entrada do inversor, foi considerado o rendimento máximo do inversor fornecido pelo fabricante, detalhado no subitem 3.2.2, de 96,6% para obter a potência na saída do inversor, que é dada pela equação:

$$P_{out-eol} = P_{in-eol} * 96,6\% \quad (3.14)$$

Em que:

$P_{out-eol}$ é a potência na saída do inversor, em W;

P_{in-eol} é a potência na entrada do inversor, em W.

Após isso, foi calculada a potência total das três fases, que é a soma da potência na saída dos cinco inversores subtraindo as perdas nos cabos que ligam os inversores ao QG. O comprimento médio estimado pelo eletricitista responsável pela Embaixada foi de 7 m, multiplicando pela resistência do cabo, que é de $3,39 \Omega/km$, tem-se que a resistência nesse cabeamento é de $0,0237 \Omega$. A corrente que passa por esse cabeamento é dada pela equação:

$$I_{eol2} = \frac{P_{out-eol}}{V_{inv-eol}} \quad (3.15)$$

Em que:

$I_{eol\ 2}$ é a corrente que vai dos inversores para o QG, em A;

$P_{out-eol}$ é a potência na saída do inversor, em W;

$V_{inv-eol}$ é a tensão na saída do inversor, em V.

Como apresentado no subitem 3.2.2 a tensão de saída nominal do inversor é de 230 V, segundo o fabricante. Mesmo que no cenário real a tensão de saída do inversor não esteja ligada a tensão fornecida pela CEB, para fins de simulação adotou-se como premissa que a SGE está ligado à CEB e a tensão fornecida será constante e igual à tensão de saída nominal do inversor em todo o tempo. Logo, $V_{inv-eol} = 230\ V$.

Portanto, a potência total das fases é dada pela seguinte equação:

$$P_{fase-eol} = \frac{5 * [P_{out-eol} - (I_{eol\ 2}^2 * R_{cabo\ 4})]}{1.000} \quad (3.16)$$

Em que:

$P_{fase-eol}$ é a potência das três fases, em kW;

$P_{out-eol}$ é a potência na saída de um inversor, em W;

$I_{eol\ 2}$ é a corrente que vai dos inversores para o QG, em A;

$R_{cabo\ 4}$ é a resistência do cabo que liga a saída dos inversores as fases, em Ω .

Como já calculado anteriormente, $R_{cabo\ 4} = 0,0237\Omega$.

Os dados de velocidade fornecidos pelo INMET também são espaçados de hora em hora, portanto a potência coincide com a energia gerada naquela hora, pela mesma razão apresentada no subitem 3.3.2.1.

Sabendo disso a energia total gerada, considerando-se as três fases, foi calculada da seguinte maneira: para a primeira hora analisada a energia foi dada pela equação:

$$E_{eol\ 1} = P_{fase-eol} \quad (3.17)$$

Em que:

$E_{eol\ 1}$ é a energia total gerada nas três fases na primeira hora da análise, em kWh;

$P_{fase-eol}$ é a potência das três fases, em kW;

A partir da segunda hora a energia é calculada pela equação:

$$E_{n+1} = P_{fase} + E_n \quad (3.18)$$

É visto que a energia gerada em uma dada hora, é a soma da potência gerada nas fases, naquela mesma hora, somada a energia total gerada na hora anterior. Assim sendo, ao final da planilha é tida a energia acumulada total gerada naquele mês.

No final da planilha foi calculada a velocidade média por hora em (m/s)/h, considerando todas as horas analisadas, e a máxima velocidade de vento registrada naquele mês. Além disso, é calculada a potência média na saída do gerador, na entrada do inversor, na saída do inversor e nas fases. E a energia total gerada acumulada no mês avaliado, que é igual à energia na última hora avaliada.

Conclui-se que, a partir das fórmulas e premissas adotadas nesse subitem, que se têm condições de compreender todo o fluxo de energia no SGE, desde a fonte primária até a energia gerada nas três fases durante o tempo de avaliação.

3.3.2.4 DIAGRAMA DE BLOCOS

Agora que já foi abordado o fluxo energético do SGFV e do SGE, só falta abordar a carga da Embaixada e o fluxo energético da CEB. Tabelas e gráficos são importantes ferramentas para a análise de um sistema, contudo não é a melhor opção, visualmente, para compreender o fluxo energético em um sistema. Em vista disso, foi criado um diagrama de blocos, por meio de planilhas eletrônicas, para se ter uma melhor compreensão do sistema como um todo e de seu funcionamento simultâneo.

Todos os valores de energia utilizados no diagrama estão em kWh e se referem a valores diários, por exemplo: a energia gerada durante um dia pelos painéis fotovoltaicos, ou pelas microturbinas eólicas; a energia fornecida pela CEB durante o período de um dia; a energia média consumida pela Embaixada diariamente; etc.

No fluxograma do SGFV, para a irradiação solar, foi utilizado um valor aleatório dentro de uma faixa de irradiação. Para realizar essa operação utilizou-se a função “ALEATÓRIOENTRE(x,y)”, que gera um número aleatório entre os limites x e y. Como limites usou-se o valor da menor e da maior irradiação solar média por dia em (kWh/m²)/dia, descrita no subitem 3.3.2.1, referente aos meses analisados dentre os 90 dias de dados disponibilizados pelo INMET.

Somente um dos nove conjuntos de módulos fotovoltaicos foi representado, pois, como adotado, todos os módulos são iguais entre si, e para este utilizou-se uma faixa de rendimento. Os módulos fotovoltaicos possuem um baixo rendimento, de acordo com o subitem 2.4.3 de até 17%. A parte da irradiação solar que não é convertida em energia elétrica é dissipada como calor, por efeito Joule, logo as temperaturas das células fotovoltaicas são bastante elevadas, podendo chegar, em dias quentes, a uma temperatura de até 90°C. A Equação 3.3 abrange esse efeito no cálculo da P_{sist} , todavia, para encontrar uma faixa de rendimento para os módulos fotovoltaicos é preciso analisar esse efeito no próprio rendimento. Para tal, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\eta_{inf} = \frac{P_{sist}}{G * N * A} \quad (3.19)$$

Em que:

η_{inf} é o rendimento considerando o efeito da temperatura nas células fotovoltaicas, em %;

P_{sist} é a potência gerada pelo conjunto de módulos fotovoltaicos, em W;

G é a irradiação solar considerada, em W/m²;

N é o número de módulos do conjunto;

A é a área dos módulos fotovoltaicos, em m².

Para o SGFV, $N = 45$ módulos e $A = 1,42$ m².

A partir dessa fórmula pode se obter o valor do rendimento referente a cada hora dos meses analisados. Com a função “MÍNIMO(intervalo)”, encontrou-se o menor valor de rendimento de cada mês e utilizou-se o menor dos valores entre os meses analisados como o limite inferior para o aleatório do rendimento do conjunto de módulos fotovoltaicos. Como limite superior aleatório do rendimento, foi utilizado o rendimento máximo dos módulos fotovoltaicos.

As perdas nos cabo que liga os módulos e os inversores foram chamadas de “perdas CC” e foi calculada como descrito no subitem 3.3.2.1. As perdas no cabeamento que liga os inversores ao QG foram nomeadas “perdas CA”, e também foram calculadas segundo a descrição no subitem 3.3.2.1.

Devido às dificuldades que impossibilitaram as medições na Embaixada, descritas no subitem 3.3.1, não foi possível criar uma faixa de rendimento para os inversores a partir de medições. Então, como limite inferior para o aleatório do rendimento do inversor considerou-se o valor de 92,96%, que foi o menor rendimento encontrado no ensaio feito por SEVERINO (2008). Como, nesse ensaio, foi utilizado outro inversor, com fabricação anterior aos da Embaixada, é de se esperar que o rendimento mínimo dos inversores da Embaixada seja um pouco superior ao encontrado no ensaio, considerando a modernização dos equipamentos. Sendo assim, a faixa de 92,96% a 97% contempla a real faixa de variação do rendimento dos inversores da Embaixada.

Após os inversores tem-se o QCG. Na saída desse quadro, considerou-se o valor de uma das fases, ou seja, três vezes a energia na saída do inversor, já consideradas as perdas CA.

Em seguida tem-se o QG, foi considerado que a energia na entrada do QG seja a das três fases, portanto, três vezes a energia na saída do QCG. Foram desconsideradas as perdas nos cabos entre os dois quadros por se tratar de uma pequena distância.

Para o fluxograma do SGE, foi feita uma análise da velocidade dos ventos e das equações que a relacionam com a potência gerada pela turbina. De todas as velocidades obtidas durante os meses analisados, apenas 4 possuem um valor superior a 6 m/s, dentro de um universo de 2.160 velocidades. De acordo com a análise feita na equação 3.11, velocidades inferiores a 6 m/s ou vai estar na equação de reta A ou na AB. Considerando que houve uma quantidade muito pequena de velocidades acima dos 6m/s, serão consideradas apenas as retas A e AB. E para essa análise de potência gerada por uma microturbina no diagrama de blocos será utilizada uma adaptação às equações da reta:

$$v \leq 1,8 \rightarrow v_i = 0; \quad (3.20)$$

$$v > 1,8 \rightarrow v_i = v - 1,8;$$

$$\overline{A_i} \rightarrow \forall v_i \leq 4,2 \rightarrow Pe_{ol} = 47,62(v_i);$$

Em que:

v_i é a adaptação da velocidade do vento para nova equação, em m/s;

Dessa forma, foi determinado que a faixa de valores aleatórios relacionados à velocidade do vento na entrada da microturbina estará entre o valor máximo entre as médias de v_i e o valor mínimo entre as médias de v_i nos meses analisados, aplicando o valor selecionado à equação $\overline{A_t}$ para, assim, se obter o valor de potência elétrica gerada pela microturbina.

Somente uma das cinco microturbinas eólicas foi representada, pois, como adotado, todas as microturbinas eólicas são iguais entre si. As microturbinas eólicas não possuem rendimento nominal, a potência é produzida por meio da curva de potência gerada em função da velocidade do vento, ao contrário dos módulos fotovoltaicos onde a energia de entrada também é dada em energia, kWh/m², possibilitando assim o cálculo do rendimento, para as microturbinas eólicas a entrada é em m/s, unidade para velocidade e não energia, impossibilitando se obter uma faixa de rendimento. Como o dado de entrada é velocidade dos ventos média por hora, é preciso que se converta a energia gerada pela microturbina para energia produzida em um dia, a fim de manter o mesmo padrão do SGFV, que ao utilizar a irradiação média diária a energia simulada corresponderia a energia gerada durante um dia. Para tal conversão, bastou-se multiplicar a potência produzida na saída da turbina, que corresponde à energia produzida em uma hora, por 24.

As perdas nos cabos que ligam as microturbinas e os inversores foram chamadas de “perdas CA 1” e foram calculadas como descrito no subitem 3.3.2.1. As perdas no cabeamento que liga os inversores ao QG foram nomeadas “perdas CA 2”, e também foram calculadas segundo a descrição no subitem 3.3.2.1.

Uma vez que o SGE está desligado da CEB e da Embaixada, não foi possível analisar uma faixa de rendimento para os inversores, por isso, foi adotada a mesma premissa que no caso dos inversores do SGFV e utilizada a faixa de 92,96% a 96,6% como sendo a faixa de variação do rendimento dos inversores do SGE.

Após os inversores, tem-se o quadro CA, na saída desse quadro considerou-se o valor das três fases, ou seja, cinco vezes a energia na saída do inversor, já consideradas as perdas CA.

Em seguida tem-se o QG, considerou-se que a energia na entrada do QG seja a das três fases, portanto, a mesma energia na saída do quadro CA. Foram desconsideradas as perdas nos cabos entre os dois quadros por se tratar de uma pequena distância.

Tanto o SGFV como o SGE permitem um único fluxo de energia, a partir dos módulos fotovoltaicos, ou das microturbinas eólicas, para o QG. No caso da concessionária, CEB, o fluxo energético é bidirecional, ou seja, caso a GD não seja capaz de suprir a demanda energética da Embaixada a CEB injetará a quantidade restante no QG, contudo se a GD for capaz de suprir toda a carga da Embaixada, e houver um excedente energético, este flui pelo cabeamento da CEB no sentido inverso, do QG para fora da Embaixada. Utilizando a função “SE(teste_lógico; [valor_se_verdadeiro]; [valor_se_falso])”, o fluxo foi condicionado da seguinte maneira, se a energia gerada pela GD for menor do que a carga, a energia fornecida pela CEB será igual a diferença entre a carga e a energia gerada. Se a energia gerada pela GD for maior que a carga da Embaixada, a energia fornecida pela CEB será igual em módulo a diferença entre a energia gerada e a carga, porém com o sentido inverso, representado pelo sinal negativo “-”.

Para o dimensionamento da carga da Embaixada foi utilizada a seguinte metodologia, pegou-se o histórico de consumo da Embaixada da Itália dos anos de 2011 e 2012, a seguir foi calculado o consumo médio mensal para o ano de 2011 e 2012. Estes dados são referentes às faturas de energia da CEB, por isso o valor de consumo já abate a energia gerada pela GD; como não foram encontrados dados sobre o histórico de geração desse período, escolheu-se entre os meses analisados a maior e menor energia mensal gerada a partir da simulação descrita no subitem 3.3.2.1. Por fim foi realizado um aleatório onde o limite superior era igual ao maior consumo médio mensal de 2011 ou 2012, somado com a maior energia gerada pelo SGFV de acordo com a simulação dos meses analisados. Para o limite inferior foi utilizado o menor consumo médio mensal de 2011 ou 2012 somado com a menor energia gerada pelo SGFV de acordo com a simulação dos meses analisados.

Todos os equipamentos relevantes foram dimensionados, foram criadas variáveis aleatórias com o propósito de tornar a simulação mais real, sendo elas a irradiação solar, a velocidade dos ventos, a eficiência dos módulos fotovoltaicos, dos inversores do SGFV e do SGE e a carga da Embaixada.

A partir desse fluxograma foram criadas tabelas, macros e gráficos para permitir uma análise mais detalhada dos dados. A primeira tabela apresenta a energia de entrada e saída do SGFV, do SGE e da GD como um todo, e ainda o rendimento parcial desses três sistemas e a rendimento total da GD. A energia de entrada do SGFV diz respeito à energia total gerada pelos nove conjuntos de módulos fotovoltaicos. Na saída do conjunto de módulos fotovoltaicos no diagrama de blocos tem-se acesso à energia gerada por um conjunto, dessa

maneira a energia de entrada do SGFV corresponde a nove vezes o valor da energia gerada por um conjunto. A energia de saída do SGFV é a energia que chegou ao QG, tem-se acesso a esse valor no diagrama de blocos como detalhado acima. A energia de entrada do SGE corresponde à energia gerada pelas cinco microturbinas eólicas, o diagrama de blocos nos fornece a energia gerada por uma microturbina, portanto basta multiplicar este valor por cinco. A energia de saída do SGE é a que chega ao QG, que também está acessível no diagrama de blocos. A energia de entrada da GD seria a soma da energia de entrada do SGFV e do SGE, semelhantemente a energia de saída da GD seria a soma das energias de saída do SGFV e do SGE.

Os rendimentos parciais são dados pela divisão das energias de saída pelas energias de entradas. Por sua vez o rendimento total da GD é dado pela divisão da energia de saída da GD pela soma da energia de entrada do SGE e da energia de entrada do SGFV, caso a eficiência dos módulos fotovoltaicos fosse igual a 100%, ou seja, aproveitando toda a energia disponível pela irradiação solar.

Com o propósito de se simular o desempenho energético da GD, com variação aleatória das grandezas já mencionadas, foram criadas duas “Macros” na planilha eletrônica. O objetivo de uma delas é atribuir valores aleatórios para as grandezas definidas e realizar os cálculos, a partir dos valores aleatórios atribuídos, e então gravar as grandezas relevantes em locais predeterminados. Essa operação é repetida por um número predefinido de vezes, gerando colunas de valores numéricos de grandezas na ordem aleatória em que foram gerados. Quanto mais casos simulados, melhores serão os resultados, uma vez que com poucos casos, a variação aleatória das grandezas pode gerar resultados que impossibilitam a percepção das distorções dos resultados, sendo assim de pouca relevância estatisticamente. Não há um número exato de casos a ser repetido na literatura especializada. Algumas referências utilizam 500 casos, por exemplo, VERONESE (2004), outras 1.000 casos, como, por exemplo, CASTRO (2004), e ainda há referências que utilizam 2.000 casos, como, por exemplo, SEVERINO (2008). Para este estudo foram adotados 2.000 casos, já que o estudo apresentado em SEVERINO (2008) se refere a um sistema híbrido bastante similar aos SGFV e SGE. A outra macro, por sua vez, copia as informações geradas e ordena, de forma crescente os valores, em colunas predeterminadas, e diferentes das utilizadas pela outra “Macro” para manter os valores originais.

Como todos os valores correspondem a energia gerada, fornecida ou consumida durante o dia, para se fazer uma análise mais ampla é preciso converter os valores de médias diárias para

anuais. Para se cumprir esta meta foi criada outra tabela, semelhante às geradas pelas “Macros”, onde é feita essa conversão, multiplicando os valores ordenados, pela “Macro” responsável pela ordenação, por um fator de 365.

Utilizando os dados dessa tabela calculou-se a média, desvio-padrão, o valor mínimo e máximo das energias de entrada e saída da GD, da gerada pelos módulos fotovoltaicos e pelas microturbinas eólicas e também do rendimento parcial da GD.

A partir dos dados calculados pela tabela de energia média anual, foram gerados três gráficos. O primeiro apresenta a distribuição acumulada dos valores calculados das energias de entrada, saída, gerada pelos módulos fotovoltaicos e pelas microturbinas eólicas, em forma de gráfico de dispersão com linhas retas. O segundo apresenta a distribuição acumulada dos valores calculados das energias gerada pelos módulos fotovoltaicos e pelas microturbinas eólicas em forma de gráfico de áreas empilhadas. E por último, a distribuição acumulada dos valores calculados do rendimento parcial do GD em um gráfico de dispersão com linhas retas.

3.3.2.5 ANÁLISE ECONÔMICA

O sistema fotovoltaico foi instalado na Embaixada da Itália no ano de 2011. Criou-se uma planilha eletrônica com o objetivo de estimar quanto a Embaixada já economizou, em reais, nesse período de três anos, 2011 a 2013. Outra planilha foi construída considerando que o SGE estava ligado à rede e funcionando nesse mesmo período de 2011 a 2013, para estimar-se a economia futura nos próximos três anos, caso o SGE seja ativado.

O primeiro passo nesse processo foi obter um histórico de tarifas desses últimos três anos, isso foi possível por meio das resoluções homologatórias da ANEEL, disponibilizadas no site da CEB. Analisando-se as faturas da Embaixada, identificou-se que ela é pertencente ao grupo tarifário horo-sazonal verde A4, e que o Imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviços (ICMS) é de 21%. A partir dessas informações, pode-se obter o histórico tarifário desejado.

Utilizando os dados gerados pela tabela de energia média anual para os 2.000 casos simulados, calculou-se a média da energia gerada pelo SGFV e a média da energia de saída, que corresponde à energia gerada pelo SGFV e pelo SGE. Esses valores encontrados foram divididos por doze, já que se tratava de uma média de geração anual e a análise corresponde a uma média de geração mensal. O grupo tarifário verde tarifa a demanda, consumo na ponta e consumo fora de ponta. A demanda, havendo geração ou não, sempre é paga pela Embaixada,

portanto a economia é proveniente somente da diminuição do consumo. O consumo na ponta corresponde à energia consumida no intervalo de horário das 18h às 21h de segunda a sexta, exceto em feriados. Como não se dispunha do histórico de geração dos sistemas, era preciso estimar quanto de energia a Embaixada gerava no horário de ponta e fora de ponta. Sendo assim, foram utilizados os noventa dias de dados de irradiação solar e velocidade dos ventos e energia total produzida pelos SGFV e SGE. Calculou-se a energia total gerada pelos sistemas e somente pelo SGFV no horário de ponta e a porcentagem de produção na ponta, e consequentemente, no fora de ponta para o horário de Brasília normal, UTC/GMT -3 h. Também se calculou, utilizando os mesmos noventa dias de dados de irradiação solar e velocidade dos ventos, a energia total gerada pelos dois sistemas no horário de ponta e a porcentagem de produção na ponta e fora de ponta considerando que nos noventa dias estivesse em vigor o horário brasileiro de verão (HV), UTC/GMT -2 h. Com o objetivo de tornar mais realista o cenário apresentado, utilizou-se os períodos reais em que o HV esteve em vigor nos três anos analisados, e calculou-se a porcentagem de dias nos cinco meses de cada ano, os quais o HV vigora, em que os sistemas teriam gerado energia no horário normal e no HV, como pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Porcentagem de dias nos anos de 2011,2012 e 2013 em que esteve em vigor o HV.

Horário brasileiro de verão (HV)				
Ano	Meses	Dias no HV	Total de dias	Porcentagem
2011	Janeiro	31	31	100%
	Fevereiro	20	28	71%
	Outubro	16	31	52%
	Novembro	30	30	100%
	Dezembro	31	31	100%
2012	Janeiro	31	31	100%
	Fevereiro	26	29	90%
	Outubro	11	31	35%
	Novembro	30	30	100%
	Dezembro	31	31	100%
2013	Janeiro	31	31	100%
	Fevereiro	17	28	61%
	Outubro	12	31	39%
	Novembro	30	30	100%
	Dezembro	31	31	100%

Com os valores de energia produzida somente pelo SGFV e a produzida por ambos, SGFV e SGE, no horário de ponta e fora de ponta, considerando os dias em que o HV esteve em vigor, tornou-se possível o cálculo da economia mensal, anual e a acumulada no período de três anos. Por fim, foram gerados quatro gráficos um com a economia mês a mês da energia

gerada só pelo SGFV, outro com a energia gerada por ambos os sistemas, o terceiro com a energia anual e acumulada nos três anos produzida pelo SGFV e a prevista para o híbrido SGFV – SGE.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentados os materiais utilizados no trabalho, com uma descrição dos componentes do sistema relevantes para o projeto. Também foi analisada, detalhadamente, a metodologia de todas as etapas desse estudo, com o passo a passo do que foi feito e o embasamento de equações utilizadas. Dessa forma, têm-se as condições necessárias para apresentação dos resultados obtidos.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Seguindo-se os passos citados no capítulo anterior, obtiveram-se os resultados planejados, por meio dos estudos realizados no SGFV e SGE da Embaixada da Itália, das conclusões a que se chegou durante as medições práticas e das simulações feitas utilizando-se o Excel[®].

Dessa forma, este capítulo presta-se a apresentar os resultados das atividades desenvolvidas no projeto, com as análises dos mesmos, acompanhadas de gráficos e tabelas originados pelas simulações computacionais.

4.2 SGFV

Como já foi dito, os dados de irradiação solar, fornecidos pelo INMET, serviram como base para o estudo do SGFV. Foram utilizados os valores de irradiação de hora em hora dos meses de novembro/13, dezembro/13 e janeiro/14. Sendo assim, pode-se calcular a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos em cada hora durante esse período, adotando-se as premissas que já foram apresentadas. Realizando-se as análises de perdas energéticas, chega-se aos valores de energia elétrica aproveitada pela Embaixada no mesmo período.

Tabela 4.1 – Irradiação solar, potências e energia total do SGFV.

Dados energéticos do SGFV da Embaixada da Itália			
	novembro-13	dezembro-13	janeiro-14
Irradiação média diária (kWh/m ²)/dia	5,42	4,92	6,28
Menor rendimento dos painéis fotovoltaicos	7,77%	7,80%	7,74%
Potência média de saída do módulo (W)	1.172,93	1.072,35	1.350,76
Potência média na entrada do inversor (W)	1.166,76	1.067,31	1.343,00
Potência média na saída do inversor (W)	1.131,76	1.035,29	1.302,71
Potência média total por fase (kW)	3,39	3,1	3,9
Energia total gerada (kWh)	7.074,52	6.919,36	8.141,56

A Tabela 4.1 mostra alguns valores encontrados por meio desses dados do INMET. Os valores de irradiação média diária de cada mês foram utilizados no diagrama de blocos, que representa o fluxo energético do sistema, para determinar o máximo e mínimo valor de irradiação solar incidente sobre os painéis fotovoltaicos. Utilizou-se como variável aleatória máxima da irradiação o maior valor médio encontrado nos 3 meses, que corresponde a 6,28 (kWh/m²)/dia, correspondente ao mês de janeiro de 2014. Como variável aleatória mínima da irradiação utilizou-se o menor valor médio encontrado nos 3 meses, igual a 4,92 (kWh/m²)/dia, referente ao mês de dezembro de 2013.

Outro valor que também foi utilizado no diagrama de blocos foi o do menor rendimento obtido nos painéis fotovoltaicos, que serviu como valor mínimo de rendimento para o conjunto de painéis. O menor valor encontrado nos 3 meses foi o de 7,74%, no mês de janeiro.

Por meio dos valores fornecidos de irradiação solar por hora e utilizando-se a equação 3.3, chega-se aos valores de potência elétrica na saída de cada conjunto de painéis fotovoltaicos. A média de todos os valores de potência na saída desses conjuntos foi calculada para cada mês. Tendo o mês de janeiro a maior média, 1.350,76 W, como esperado, já que possui a maior média de irradiação. Da mesma forma, a menor média de potência na saída dos conjuntos ocorreu no mês de dezembro, 1.072,35 W.

Em seguida, são calculadas as potências médias na entrada e saída dos inversores, observando-se a diminuição da potência durante esse fluxo energético devido às perdas. A energia que vai dos conjuntos de painéis sofre perdas no cabeamento até chegar à entrada do inversor. A potência na saída do inversor também diminui quando comparada a da entrada, devido ao rendimento do inversor, que para essa etapa da simulação foi considerado como 97%, rendimento máximo dos inversores. No estudo realizado por diagrama de blocos esse rendimento será considerado como uma incerteza, possuindo valores aleatórios dentro de uma faixa de valores.

Considerando que as potências médias apresentadas até então correspondem a um conjunto de painéis fotovoltaicos e seu inversor isoladamente, calcula-se a potência média total em uma fase, equivalente a potência gerada e transmitida por três conjuntos. Essa potência já considera as perdas em cabeamento que da saída dos inversores ao barramento onde ocorre a distribuição por fases. Os valores encontrados para potência média total por fase são de 3,39 kW, para novembro, 3,10 kW, para dezembro e 3,90 kW, para janeiro. Uma vez que, para essas médias, consideram-se inclusive as horas diárias em que não existe irradiação solar, os

valores de potência elétrica gerada pelo SGFV durante o dia, em horários de muita irradiação solar, são significativos e bem acima das médias.

Calcula-se também a energia elétrica total gerada pelos SGFV durante cada um dos três meses, de acordo com a equação 3.18. A maior energia elétrica produzida nesses 3 meses foi de 8.141,56 kWh, no mês de janeiro.

Com base nos dados de consumo energético da Embaixada da Itália dos anos de 2009, 2010, antes da inserção do SGFV, o maior valor mensal de energia elétrica consumida nesse período foi de 43.713 kWh e a média de consumo mensal de energia elétrica foi de 35.760,45 kWh. Observa-se que a geração máxima de energia do SGFV nos 3 meses analisados corresponde a 18,63% do maior consumo mensal nos anos de 2009 e 2010 e a 22,77% do consumo mensal médio nesses anos. Representando, assim, uma quantidade significativa de energia quando comparada à consumida pela Embaixada.

4.3 SGE

Assim como para o SGFV, o estudo realizado no SGE tem como base os dados fornecidos pelo INMET, nesse caso com relação ao vento. Os valores de velocidade do vento possibilitam o cálculo de potências e energias produzidas durante os meses analisados, adotando-se as premissas já apresentadas. Foram analisados 4 meses, sendo que 10 dias do mês de novembro e 19 dias do mês de fevereiro.

Tabela 4.2 – Velocidade do vento, potências e energia total do SGE.

Dados energéticos do SGE da Embaixada da Itália				
	novembro-13	dezembro-13	janeiro-14	fevereiro-14
Velocidade média do vento (m/s)	2,12	2,41	2,39	2,53
Fator de velocidade do vento (m/s)	0,53	0,81	0,84	0,92
Potência média de saída do gerador (W)	25,24	38,61	40,09	44,05
Potência média na entrada do inversor (W)	25,24	38,61	40,09	44,05
Potência média na saída do inversor (W)	24,38	37,29	38,72	42,55
Potência média total nas fases (kW)	0,12	0,19	0,19	0,21
Energia total gerada (kWh)	29,26	138,73	144,05	96,37

A Tabela 4.2 mostra alguns valores encontrados por meio desses dados do INMET. Os valores de velocidade média v_i do vento de cada mês foram utilizados na elaboração do diagrama de blocos, que representa o fluxo energético do sistema, para determinar o máximo e mínimo valor de velocidade do vento adaptada que passa pelas microturbinas. O valor aleatório escolhido, entre esses extremos, será utilizado na equação de reta $\overline{A_i}$ encontrando o valor de Pe_{ol} . Utilizou-se como variável aleatória máxima de velocidade v_i do vento o maior valor médio encontrado nos 4 meses, que corresponde a 0,92 m/s, correspondente ao mês de fevereiro de 2014. Como variável aleatória mínima de velocidade do vento utilizou-se o menor valor médio encontrado nos 4 meses, igual a 0,53 m/s, referente ao mês de novembro de 2013.

Por meio dos valores fornecidos de velocidade do vento v_i e utilizando-se a equação 3.20, chega-se aos valores de potência elétrica na saída de cada microturbina. A média de todos os valores de potência na saída dessas turbinas foi calculada para cada mês. Tendo o mês de fevereiro a maior média, 44,05 W, como esperado, já que possui a maior média de velocidade do vento. Da mesma forma, a menor média de potência na saída dos conjuntos ocorreu no mês de novembro, 25,24 W.

As perdas energéticas da saída das microturbinas à entrada dos inversores são muito pequenas, como pode ser observado na tabela 4.2. Em seguida, mostra-se o valor de potência média na saída dos inversores, observando-se uma diminuição da potência devido ao rendimento de cada inversor. A potência média total nas fases apresentada na tabela é 5 vezes a potência na saída do inversor menos a potência dissipada em cabeamento.

Por fim, é calculada a energia total produzida pelas turbinas durante cada mês, a maior energia mensal é a do mês de janeiro com 144,05 kWh, o mês de novembro teve a menor produção energética, 29,26 kWh, o que já era esperado, pois só foram analisados 10 dias para esse mês.

A potência máxima que pode ser gerada pelo SGFV é de 49 kWp e a potência máxima do SGE é de 5,5 kVA. Tendo esses valores como base, espera-se que o SGFV gere uma quantidade de energia 8,9 vezes maior que a do SGE. Contudo, observa-se que a energia produzida pelo SGE tem valores abaixo dos esperados, comparados aos do SGFV. Para os 3 meses analisados, a maior energia gerada pelo SGFV é aproximadamente 56 vezes maior que a maior energia gerada pelo SGE. Quando comparada com o consumo energético mensal da Embaixada em 2009 e 2010, a energia produzida pelo SGE possui valor pouco significante. A

maior energia mensal obtida nos 3 meses representa 0,4% da média de consumo mensal durante esses anos.

4.4 DIAGRAMA DE BLOCOS

A partir da base de dados coletadas e descritas nos itens anteriores, tem-se as ferramentas necessárias para o desenvolvimento da simulação do sistema como um todo. Como já foi mencionado, o diagrama de blocos apresenta de forma dinâmica o fluxo energético da Embaixada da Itália. E, por meio dele, é possível extrair-se os resultados de interesse nesse trabalho. Estão consideradas nesse diagrama as incertezas, que são representadas pelas variáveis aleatórias. A Figura 4.1 apresenta o diagrama de blocos, com os valores atribuídos para cada variável aleatória em um dado momento.

O diagrama apresentado corresponde ao fluxo energético diário da Embaixada da Itália. As células que se encontram em vermelho são as correspondentes às variáveis aleatórias. São elas: irradiação solar média diária, fator de velocidade do vento, rendimento das placas fotovoltaicas, rendimento dos inversores do SGFV, rendimento dos inversores do SGE e carga diária da Embaixada.

Para este caso, verifica-se que dentre os valores de irradiação solar média diária que podem variar de 4,92 (kWh/m²)/dia a 6,28 (kWh/m²)/dia, foi selecionado o valor de 5,71 (kWh/m²)/dia. O valor do rendimento do conjunto de painéis fotovoltaicos também é obtido dentre variáveis aleatórias, que vão de 7,74% a 8,51%. No caso apresentado, o valor foi de 7,94%. O rendimento dos inversores do SGFV, que também é resultado de variáveis aleatórias, poderia estar entre 92,96% a 97% e foi de 95,31%.

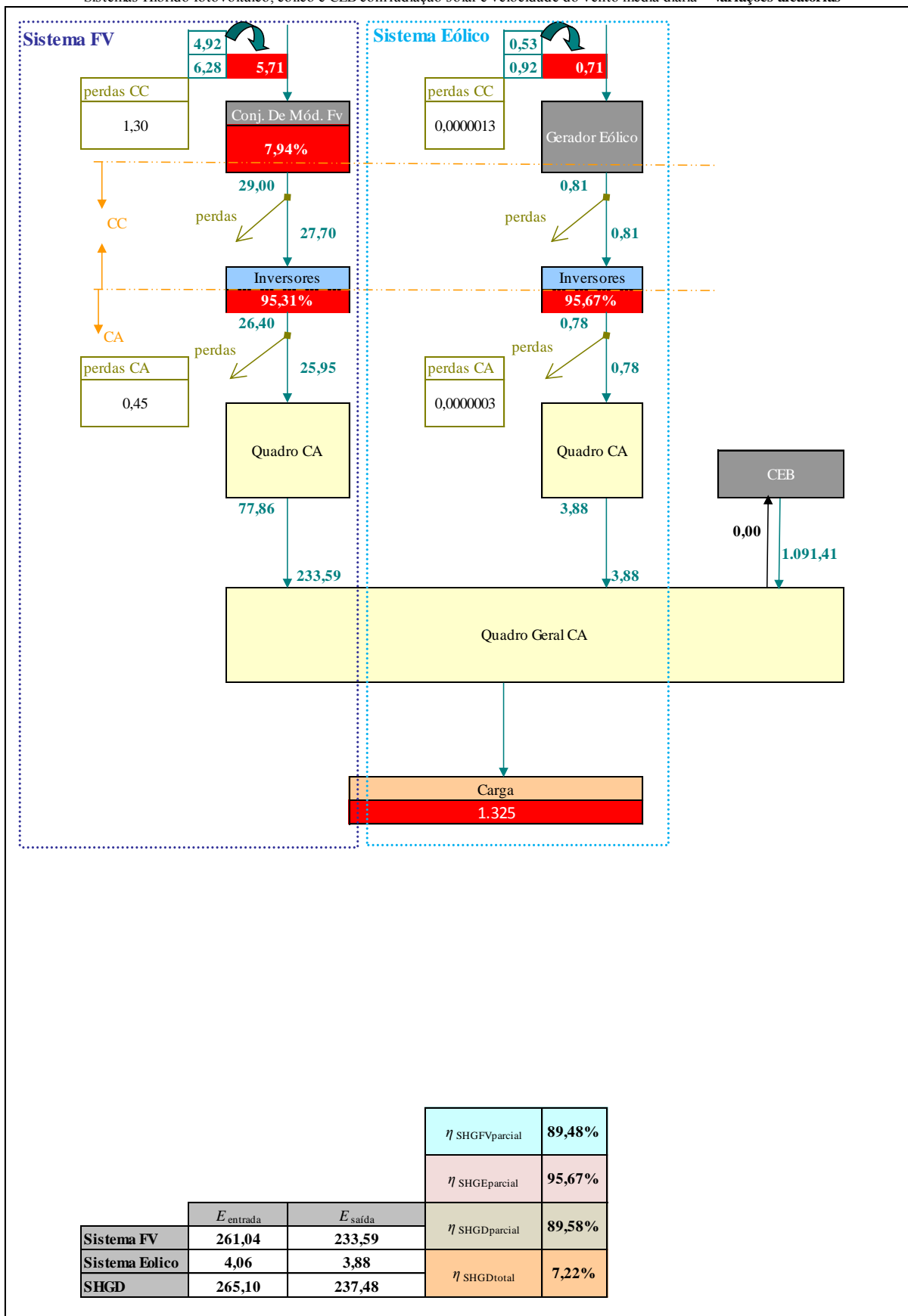


Figura 4.1 – Diagrama de blocos.

O fator de velocidade do vento, que serve como base para equação 3.20, varia de 0,53 m/s a 0,92 m/s, e o valor obtido foi de 0,71 m/s. O rendimento dos inversores do SGE poderia estar entre 92,96% a 96,6% e foi de 95,67%.

A carga diária da Embaixada possui variáveis aleatórias que vão de 1.116,66 W a 1.333,33 W, e foi de 1.325 kWh. Esses valores máximo e mínimo de carga foram obtidos de acordo com o que foi descrito no item 3.3.2.4.

Com todos esses valores, é possível analisar-se o fluxo energético do sistema. Para este caso, a energia diária gerada por um conjunto de painéis fotovoltaicos foi de 29,00 kWh. Considerando-se as perdas nos cabos em CC, a energia diária na entrada dos inversores do SGFV foi de 27,70 kWh. Após passar pelo inversor a energia cai para 26,40 kWh. Mais uma vez existem perdas em cabeamento, que ligam os inversores ao QCG, sendo a energia na entrada do quadro igual a 25,95 kWh. Por fim os conjuntos são divididos em 3 fases, cada uma com 3 conjuntos, tendo, assim, cada fase 77,86 kWh. A energia somada das 3 fases que entra no QG foi de 233,59 kWh.

Para o SGE, o processo é semelhante. A energia na saída de um gerador eólico foi de 0,81 kWh, no cabeamento até o inversor, a perda foi desprezível, dessa forma, a energia se manteve em 0,81 kWh. Ao passar pelo inversor, a energia cai para 0,78 kWh e mais uma vez os valores de perdas em cabeamento são desprezíveis, chegando ao QCG os mesmos 0,78 kWh. Na entrada do QG, a energia diária correspondente ao SGE é 5 vezes a de um gerador, sendo igual a 3,88 kWh.

Mais uma vez, é possível observar-se a diferença entre os valores de energia produzidos pelo SGFV e os produzidos pelo SGE, sendo esses bem menores que aqueles, representando uma parcela muito pequena da carga energética diária da Embaixada.

A energia de saída dos sistemas, somando a do SGFV e a do SGE, foi igual a 237,47 kWh. Como a energia consumida nesse dia pela Embaixada foi de 1.325 kWh, a CEB forneceu a diferença que é equivalente a 1091,41 kWh. Sendo assim, a energia diária fornecida pelo SGFV e pelo SGE, para este caso, corresponde a 17,92% do consumo da Embaixada.

O rendimento parcial do SGFV foi de 89,48%, enquanto o do SGE foi de 95,67%. O rendimento parcial dos dois sistemas foi de 89,58% e o rendimento total dos dois sistemas foi de 7,22%.

4.5 TABELAS

Serão analisados 2.000 casos, como o descrito acima, modificando-se as variáveis aleatórias. As “Macros” serão responsáveis por coletar os valores de energia de entrada e de saída do SGFV, do SGE e do sistema como um todo, além dos rendimentos parciais dos sistemas e rendimento total, e gravá-los em uma tabela que será colocada na ordem crescente dos valores. A Tabela 4.3 apresenta 20 dos valores gravados dentre os 2.000 casos simulados, considerando-se a energia em um ano, que foi obtida multiplicando os valores energéticos diários por 365. Todos os valores de energia da tabela estão em kWh.

Tabela 4.3 – Valores energéticos anuais de 20 casos da simulação, em kWh.

E entrada	E saída	η parcial	EFV	Eeol	ECEB
81.651,94	73.435,70	86,69	72.304,05	1.028,07	327.477,46
82.037,00	73.626,80	86,69	72.370,77	1.028,51	330.026,25
82.394,74	73.832,31	86,75	72.463,93	1.028,95	332.120,63
82.412,29	74.124,45	86,83	72.510,20	1.030,39	332.609,69
82.525,58	74.126,21	86,86	72.536,49	1.030,72	332.727,58
82.542,71	74.311,23	86,87	72.584,44	1.031,61	332.806,07
82.701,38	74.340,27	86,88	72.586,49	1.032,27	332.902,92
82.759,37	74.435,90	86,89	72.759,30	1.032,71	332.935,66
82.867,27	74.479,70	86,90	72.918,10	1.032,71	333.079,43
82.943,89	74.671,97	86,90	72.998,15	1.034,15	333.149,84
82.959,38	74.845,16	86,91	73.048,16	1.035,36	333.248,77
82.982,04	74.996,07	86,92	73.048,47	1.037,69	333.278,09
83.039,52	75.004,71	86,95	73.131,12	1.038,57	333.391,63
83.063,67	75.024,22	86,95	73.147,13	1.039,56	333.559,13
83.124,48	75.081,53	86,95	73.150,55	1.041,33	333.862,65
83.267,47	75.086,37	86,99	73.169,51	1.041,78	334.066,65
83.332,05	75.125,33	87,01	73.204,28	1.042,11	334.573,50
83.332,58	75.154,15	87,01	73.208,94	1.042,22	334.672,03
83.648,82	75.162,68	87,01	73.243,28	1.042,66	334.837,79
83.685,28	75.175,89	87,02	73.254,81	1.044,32	334.864,31

O valor de “E entrada” representa a energia total gerada por todos os conjuntos de módulos fotovoltaicos mais a energia total gerada por todas as microturbinas durante um ano. “E saída” é a energia total gerada durante o ano pelos 2 sistemas entregue ao barramento do QG, ou seja, já sendo consideradas as perdas dos sistemas. O rendimento apresentado na tabela é o parcial dos dois sistemas juntos, obtido pela divisão da “E saída” pela “E entrada”. Os valores de “EFV” e “Eeol” apresentam, separadamente, a energia de saída do SGFV e do SGE, respectivamente. Por fim, a tabela apresenta o valor da energia fornecida pela CEB durante o ano.

Com base nos 2.000 casos analisados é possível que se apresente valores de média, desvio padrão, e máximo e mínimo, esses valores são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Média, desvio-padrão, mínimo e máximo dos 2.000 casos simulados.

	<i>E</i> entrada	<i>E</i> saída	η parcial	<i>E</i> FV	<i>E</i> eol	<i>E</i> CEB	h/dia	h/dia FV	h/dia Eol
média	96.904,01	86.619,66	89,25	85.359,37	1.436,48	370.701,02	9,89	9,74	0,16
desvio-padrão	7.175,26	5.987,15	1,13	6.073,79	223,43	18.495,72	0,68	0,69	0,03
mínimo	81.651,94	73.435,70	86,69	72.304,05	1.028,07	327.477,46	8,38	8,25	0,12
máximo	113.566,39	101.867,79	91,93	100.065,70	1.852,11	412.261,64	11,63	11,42	0,21

Tomando como base os dados da Tabela 4.4, pode-se observar que, para os 2.000 casos simulados, em média, a energia fornecida pelos dois sistemas equivale a 18,94% da energia total consumida pela Embaixada. Sendo que a energia fornecida pelo SGFV representa 18,67% da consumida e a fornecida pelo SGE é de apenas 0,31%. Fica evidente, mais uma vez, a grande diferença entre a produção do SGFV e a do SGE.

Os valores de rendimento parcial vão de 86,69% a 91,93%, com média de 89,25%, considerando que esse rendimento leva em conta o sistema como um todo, pode-se considerá-lo com valores dentro do esperado.

A coluna da tabela que indica “h/dia” apresenta a energia média fornecida por hora do sistema como um todo. A média para os 2.000 casos analisados foi de 9,89 kWh, com mínimo de 8,38 kWh e máximo de 11,63 kWh.

A coluna que indica “h/dia FV” apresenta valores de energia média fornecida pelo SGFV por hora, tendo um valor máximo de 11,42 kWh e mínimo de 8,25 kWh, e, como média, 9,74 kWh. O SGFV possui uma potência de pico igual a 49 kWp, para atingir esse valor é necessário que haja uma condição climática favorável de irradiação solar incidente. Considerando-se que, em média, tenham-se 12 horas de sol por dia e que nessas horas fosse possível sempre ter a produção de potência máxima do SGFV, a energia média produzida por hora seria de 24,5 kWh, metade da potência de pico. Porém, sabe-se que, dentre as 12 horas de sol, em poucas delas seria possível a produção máxima de potência. Dessa forma, a média encontrada na simulação de 9,74 kWh de energia fornecida por hora possui um bom valor, pois representa quase 5 horas de produção máxima de potência, com o restante do dia sem produção de energia elétrica pelo SGFV.

No caso do SGE, existe uma diferença, sua fonte de energia é o vento, que se faz presente durante as 24 horas do dia, em alguns momentos com maior velocidade em outros com menor. Cada microturbina possui uma potência máxima de 1,1 kWp, que é atingida para uma velocidades do vento acima de 14 m/s. Como existem 5 turbinas no SGE, a potência máxima do mesmo é de 5,5 kWp. A média de energia gerada por hora pelo SGE, “h/dia Eol”, foi de

0,16 kWh, com mínimo de 0,12 kWh e máximo de 0,21 kWh. Esses valores são muito pequenos quando comparados com a potência máxima do sistema. Isso ocorre porque as condições de vento na região não favorecem a utilização dessas microturbinas eólicas. Esse fato é notável quando se observa que a máxima velocidade do vento medida nos 3 meses analisados foi de 7,3 m/s, sendo a maior velocidade média do vento nesses meses igual a 2,53 m/s, valores muito abaixo dos 14 m/s necessários para produção de potência máxima.

4.6 GRÁFICOS

Por meio das tabelas elaboradas a partir dos 2.000 casos simulados de fluxo energético do da Embaixada, podem-se realizar análises gráficas, que facilitam a visualização do comportamento do sistema como um todo. O Gráfico 4.1 e 4.2 mostram o desempenho dos sistemas com a distribuição energética do mesmo dentro dos 2.000 casos.

Como pode ser observado, o Gráfico 4.2 representa a distribuição de energia fornecida em um ano pelo SGE. Ele foi gerado separadamente do Gráfico 4.1, que tem a distribuição energética anual do SGFV e da entrada e saída dos dois sistemas, por possuir valores de energia bem menores, facilitando, assim, sua visualização.

Observa-se do Gráfico 4.1 que a curva da energia total de saída praticamente coincide com a curva dos módulos fotovoltaicos, evidenciando que a energia fornecida pelo SGFV é bem maior que a fornecida pelo SGE.

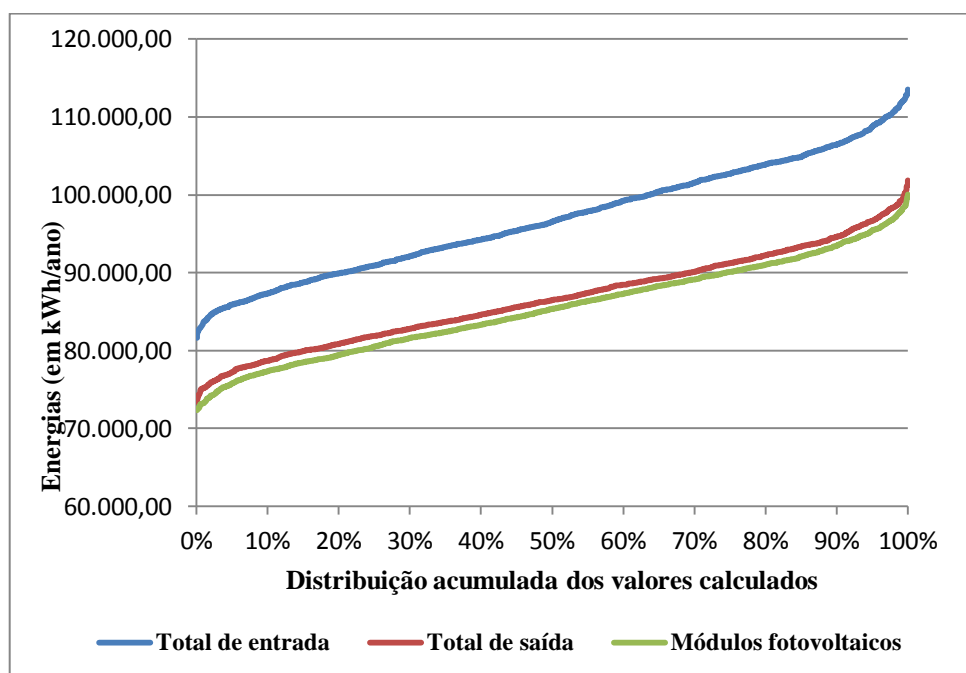


Gráfico 4.1 – Energias anuais obtidas na simulação com variáveis aleatórias.

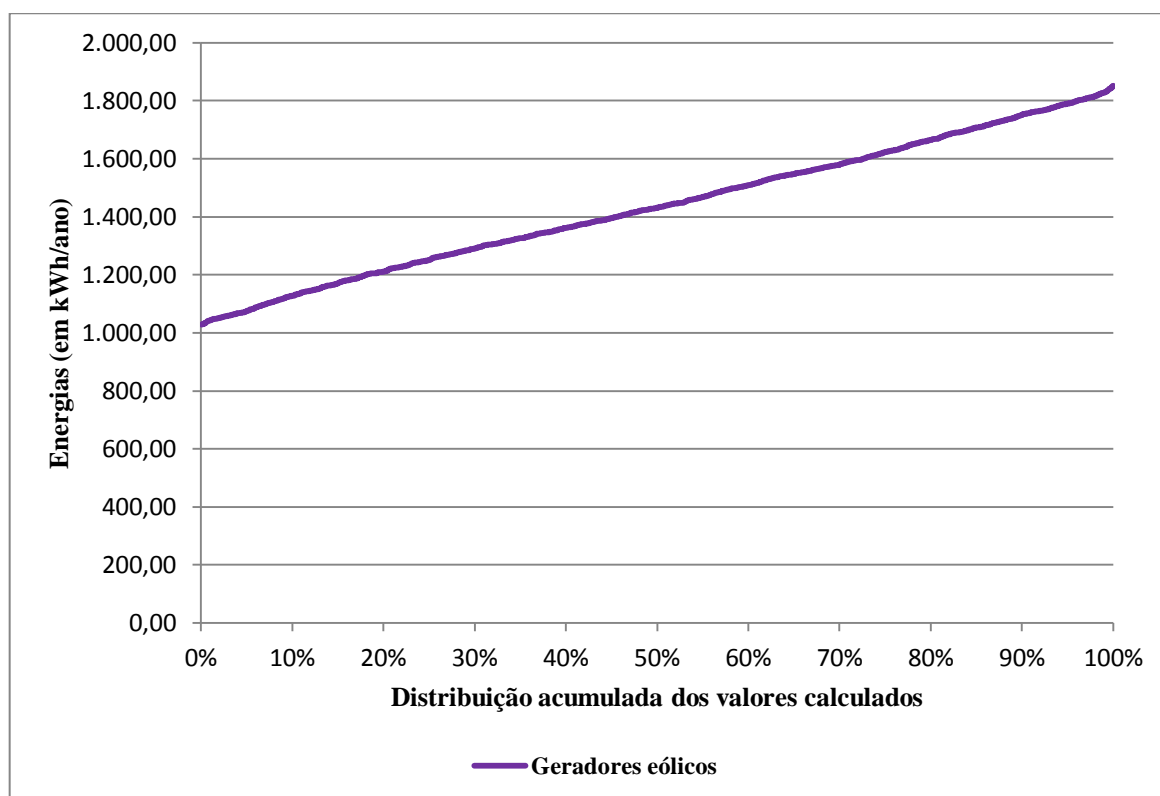


Gráfico 4.2 – Energia eólica anual obtida na simulação com variáveis aleatórias.

Por meio do Gráfico 4.1, é possível constatar que há a probabilidade de 95% do valor de energia de entrada anual ser superior a 85.900,48 kWh. Também se pode observar que há a probabilidade de 95% do valor de energia de saída anual ser superior a 77.227,37 kWh. A média encontrada na simulação de energia anual fornecida pela CEB é de 370.701,02 kWh. Dessa forma, os valores de energia de saída para 95% dos casos representam mais de 20% da energia média fornecida pela CEB.

O Gráfico 4.3 mostra as parcelas de energia fornecida à carga, contidas no Gráfico 4.1 e 4.2, acumuladas para totalizar na energia de saída dos sistemas. Favorecendo a análise da parcela de energia produzida pelo SGFV e da parcela fornecida pelo SGE.

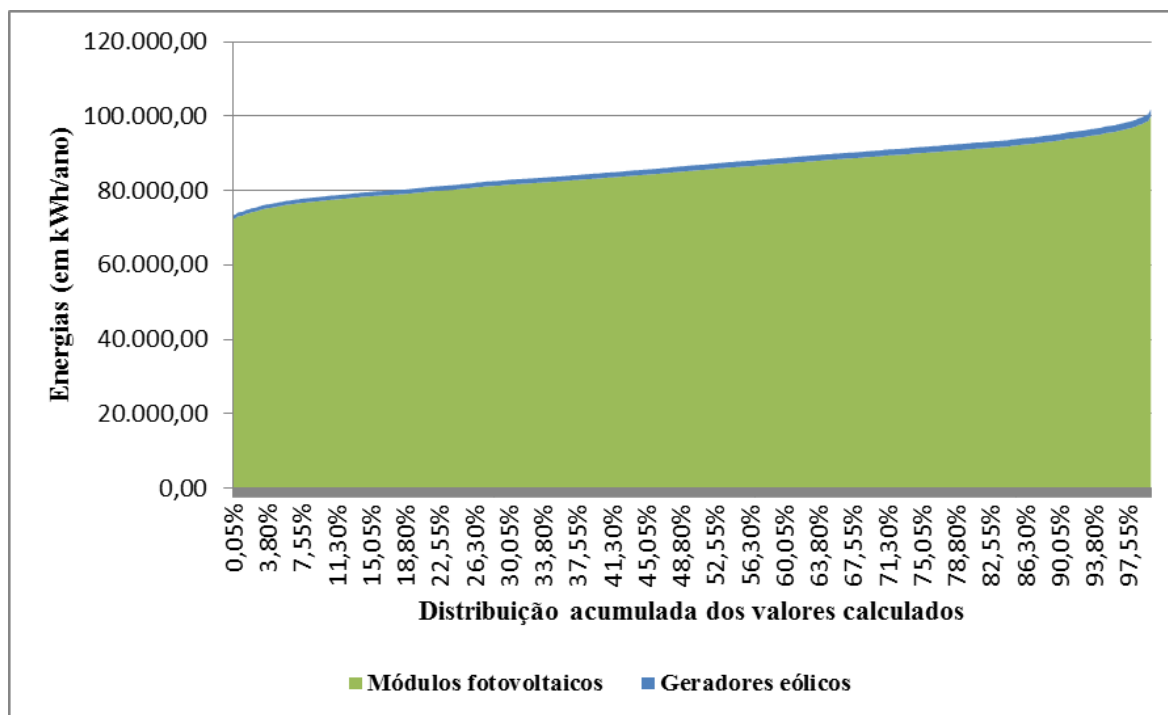


Gráfico 4.3 – Energia total de saída dos sistemas, decomposta pelas parcelas fornecidas pelo SGFV e pelo SGE.

O Gráfico 4.4 também traz informações importantes a respeito do comportamento dos sistemas, ele mostra a distribuição dos rendimentos parciais nos 2.000 casos simulados.

O gráfico proporciona uma boa visualização dos rendimentos do sistema, que, como já foi dito, estão em uma faixa consideravelmente boa, com uma parcela significativa acima dos 90% de rendimento, 30% dos casos.

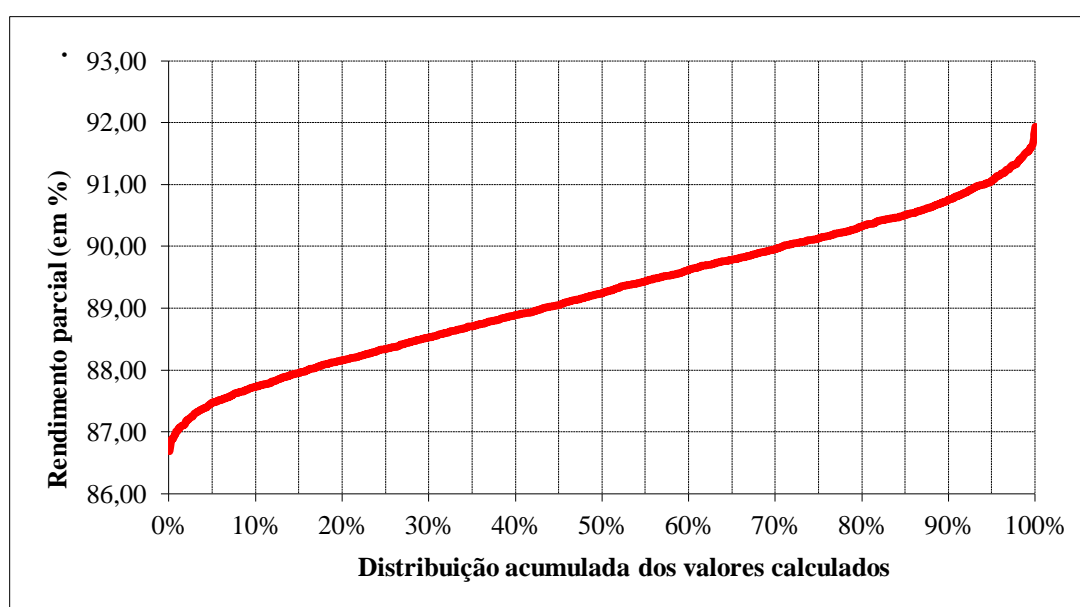


Gráfico 4.4 – Distribuição dos rendimentos encontrados na simulação com variáveis aleatórias.

4.7 ECONOMIA GERADA PELOS SISTEMAS

A média de fornecimento de energia anual dos dois sistemas para os 2.000 casos analisados foi de 86.619,66 kWh, resultando em um fornecimento médio mensal de 7.218,31 kWh. Foi estimado que 0,52% da energia fornecida pelos sistemas encontrava-se no horário de ponta, quando o HV está em vigor 2,88% da energia fornecida pelos sistemas encontra-se no horário de ponta. Tendo esses dados como base e conhecendo os valores de tarifa para cada mês e ano, pode-se estimar qual foi a economia gerada pelos sistemas em cada mês. A Tabela 4.5 apresenta a economia gerada em cada mês e ano, e o Gráfico 4.4 e Gráfico 4.5 representam os valores da tabela.

Tabela 4.5 – Economia gerada pelos sistemas, SGFV e SGE.

Economia dos SGFV e SGE			
Anos	2011	2012	2013
Janeiro	R\$ 1.447,06	R\$ 1.660,52	R\$ 1.938,61
Fevereiro	R\$ 1.410,44	R\$ 1.640,83	R\$ 1.499,51
Março	R\$ 1.310,81	R\$ 1.494,39	R\$ 1.444,60
Abril	R\$ 1.312,94	R\$ 1.496,21	R\$ 1.410,82
Maio	R\$ 1.434,25	R\$ 1.632,25	R\$ 1.421,97
Junho	R\$ 1.439,91	R\$ 1.648,87	R\$ 1.412,30
Julho	R\$ 1.435,64	R\$ 1.627,89	R\$ 1.424,78
Agosto	R\$ 1.436,19	R\$ 1.630,73	R\$ 1.515,35
Setembro	R\$ 1.578,20	R\$ 1.783,37	R\$ 1.558,30
Outubro	R\$ 1.720,50	R\$ 1.861,04	R\$ 1.563,95
Novembro	R\$ 1.799,50	R\$ 1.948,81	R\$ 1.754,00
Dezembro	R\$ 1.664,33	R\$ 1.938,85	R\$ 1.653,03
Total	R\$ 17.989,77	R\$ 20.363,75	R\$ 18.597,23

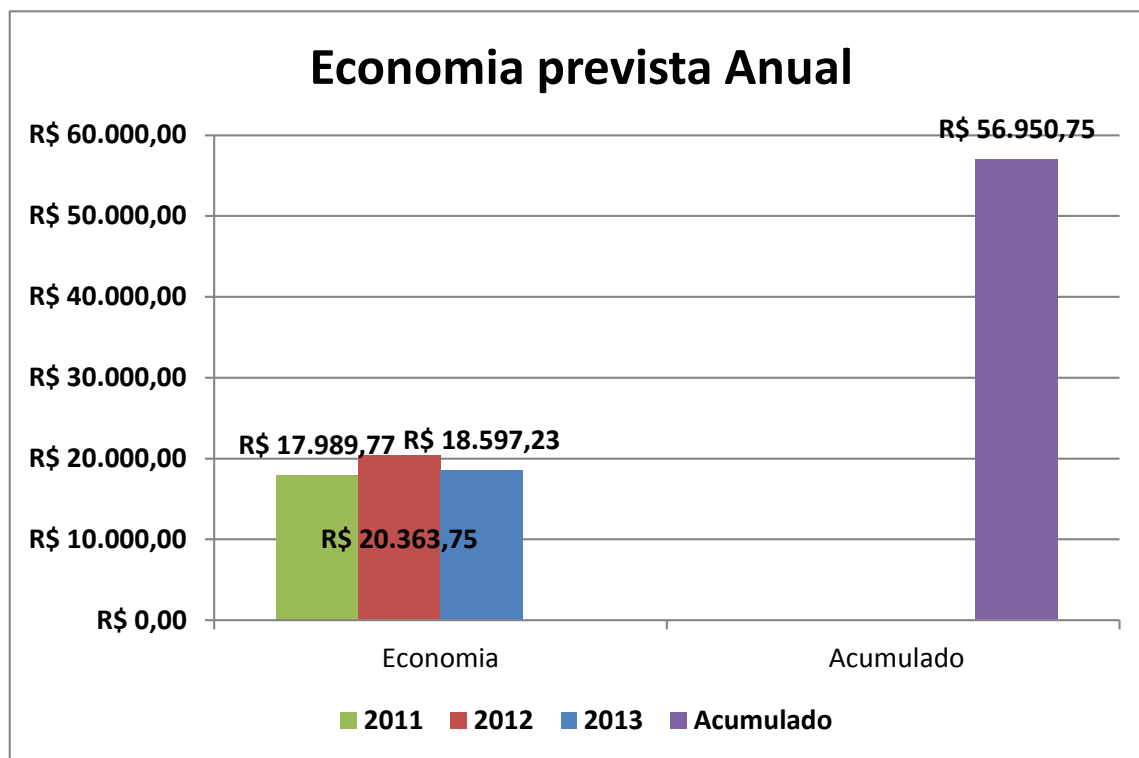


Gráfico 4.5 – Economia anual prevista, 2011, 2012, 2013, com acumulado.

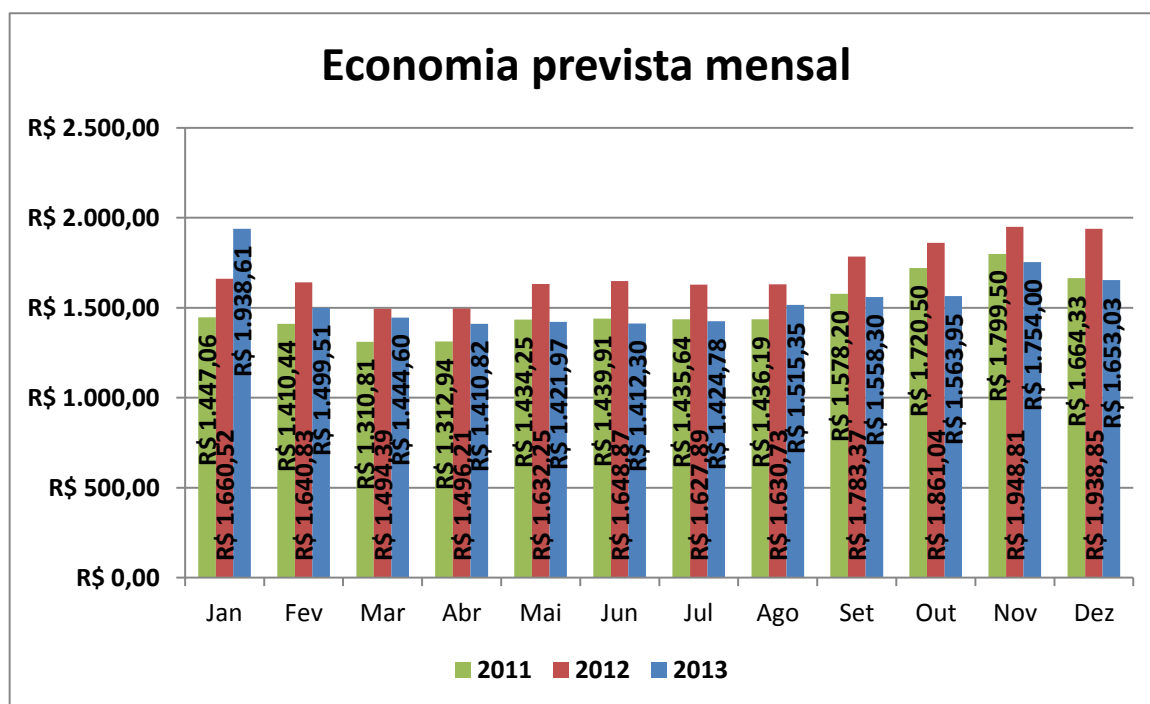


Gráfico 4.6 – Economia mensal prevista para cada ano.

Os gráficos facilitam a visualização da economia gerada pela união dos dois sistemas. O Gráfico 4.4 possibilita a comparação da geração ano a ano, além de fornecer o total acumulado nos 3 anos. O Gráfico 4.5 mostra a economia gerada mês a mês. As diferenças existentes entre meses e anos devem-se aos diferentes valores de tarifas encontrados, já que

como energia fornecida foi utilizada para todos os meses a média de energia mensal fornecida na simulação dos 2.000 casos. O valor total de economia previsto nos 3 anos para os dois sistemas em funcionamento foi de R\$ 74.626,34. Com base em faturas da CEB, dos meses de outubro, novembro e dezembro de 2012, verifica-se que em média o valor da conta foi de R\$ 11.118,06. Considerando que essa média permaneça por 3 anos, o valor total das faturas seria de R\$ 400.250,16. Dessa forma o valor total de economia previsto para os 3 anos representa 14,23% do valor previsto de faturas da CEB.

A mesma análise foi feita, considerando apenas o SGFV. A média de fornecimento de energia anual do SGFV para os 2.000 casos analisados foi de 85.359,37 kWh, resultando em um fornecimento médio mensal de 7.113,28 kWh. Foi estimado que 0,36% da energia fornecida pelo sistema encontrava-se em horário de ponta, quando o HV está em vigor 2,67% da energia fornecida pelo SGFV encontra-se no horário de ponta. Tendo esses dados como base e conhecendo os valores de tarifa para cada mês e ano, pode-se estimar qual foi a economia gerada pelo SGFV em cada mês. A Tabela 4.6 apresenta a economia gerada em cada mês e ano, e o Gráfico 4.6 e o Gráfico 4.7 representam os valores da tabela.

Tabela 4.6 – Economia gerada pelo SGFV.

Economia do SGFV			
Anos	2011	2012	2013
Janeiro	R\$ 1.413,72	R\$ 1.622,67	R\$ 1.900,11
Fevereiro	R\$ 1.378,27	R\$ 1.603,57	R\$ 1.470,10
Março	R\$ 1.281,74	R\$ 1.461,61	R\$ 1.416,92
Abril	R\$ 1.283,82	R\$ 1.463,40	R\$ 1.383,79
Maio	R\$ 1.403,24	R\$ 1.597,31	R\$ 1.394,72
Junho	R\$ 1.408,78	R\$ 1.613,56	R\$ 1.385,23
Julho	R\$ 1.404,59	R\$ 1.593,03	R\$ 1.397,48
Agosto	R\$ 1.405,14	R\$ 1.595,81	R\$ 1.486,70
Setembro	R\$ 1.544,41	R\$ 1.749,24	R\$ 1.528,85
Outubro	R\$ 1.682,87	R\$ 1.824,93	R\$ 1.533,95
Novembro	R\$ 1.759,44	R\$ 1.910,10	R\$ 1.719,62
Dezembro	R\$ 1.626,40	R\$ 1.900,35	R\$ 1.620,63
Total	R\$ 17.592,42	R\$ 19.935,57	R\$ 18.238,10

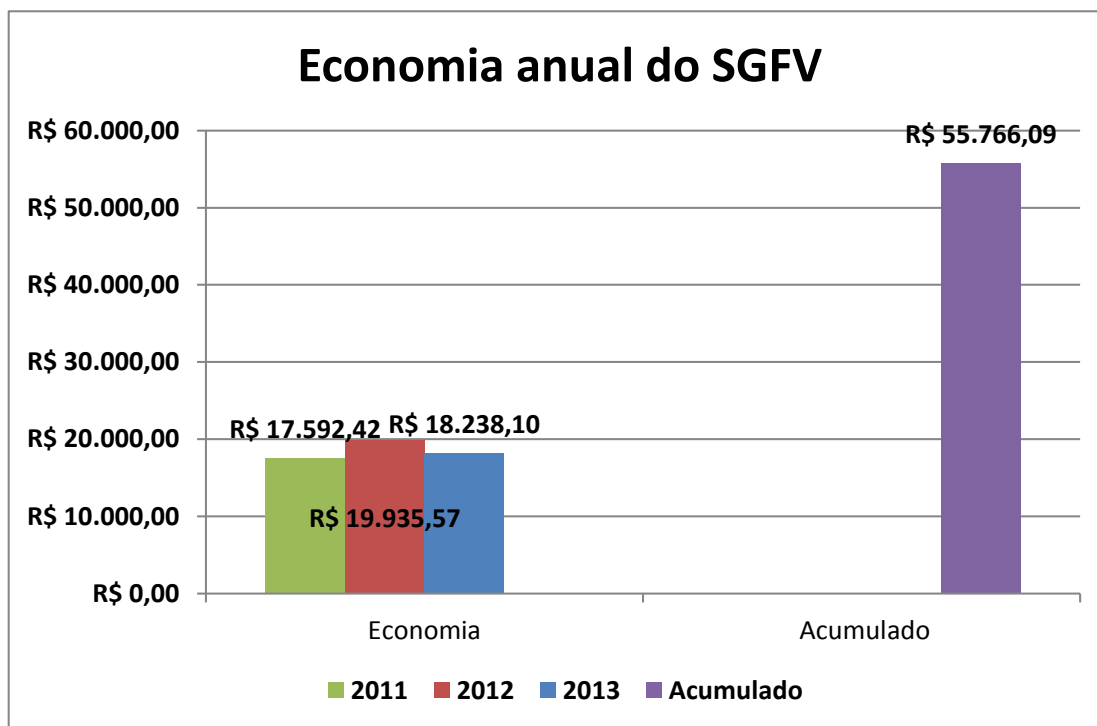


Gráfico 4.7 – Economia anual do SGFV, 2011, 2012, 2013, com acumulado.

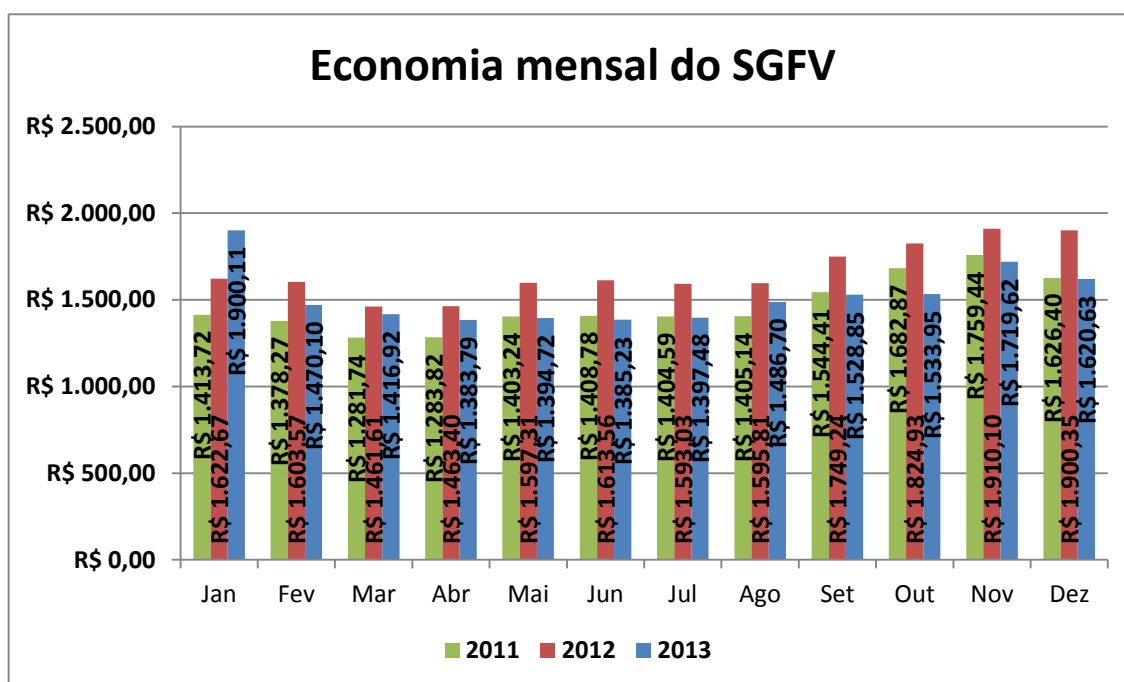


Gráfico 4.8 – Economia mensal do SGFV para cada ano.

Observa-se dos gráficos e da tabela que, com relação à economia proporcionada pela energia fornecida pelos sistemas, o valor total da economia gerada apenas pelo SGFV representa 97,92% da economia total dos dois sistemas. Como era esperada, a pequena parcela de energia fornecida pelo SGE se reflete na economia gerada pelo mesmo, muito menor que a do SGFV.

4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os resultados encontrados a partir do que foi descrito na metodologia foram apresentados e discutidos neste capítulo. O uso de gráficos, de tabelas e do diagrama de blocos facilitou a compreensão dos resultados da simulação, com uma melhor visualização dos aspectos que foram analisados.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 ASPECTOS GERAIS

Com base no contexto de mudanças de cenário da atual organização do sistema elétrico, decidiu-se realizar este trabalho com o objetivo de analisar-se um caso concreto que reflete essa situação. Realizou-se um estudo no SGFV e no SGE da Embaixada da Itália no Brasil, com uma análise técnica, seguida de um cálculo da economia gerada com a energia produzida pelos sistemas.

As simulações realizadas tiveram como um dos pilares a consideração das incertezas que existem nos sistemas, dessa forma o projeto foi desenvolvido com base em algumas variáveis aleatórias, o que permitiu o alcance de resultados mais seguros a respeito dos sistemas. Vale lembrar que várias premissas foram consideradas, de acordo com as condições existentes no desenvolvimento do projeto.

Sabendo-se que o SGFV e o SGE são casos particulares de GD, o Capítulo 2 apresentou o embasamento teórico relacionado a esse tema, abordando o atual panorama em que se o sistema elétrico, com os principais motivos que impulsionam as mudanças estruturais do mesmo. Chega-se assim ao tema de GD, onde se encontram definições e características relevantes dessa forma de geração. Em seguida, as características das fontes de geração fotovoltaica e eólica são apresentadas, com uma descrição da forma de funcionamento das mesmas e de como ocorre a geração de energia elétrica a partir da energia proveniente delas.

Com isso, o Capítulo 3 prestou-se a descrever todos os materiais utilizados no projeto, apresentando os equipamentos que fazem parte do SGFV e do SGE e que foram analisados no estudo, além dos instrumentos de medição e da ferramenta computacional utilizada nas simulações. Em seguida, a metodologia das simulações foi detalhada passo a passo, com todos os quesitos necessários para continuidade do trabalho.

O Capítulo 4 apresentou os resultados obtidos, com uma análise dos mesmos, ficando claro que a proposta da simulação foi alcançada, podendo ser visualizada por meio dos gráficos que possuem as curvas de distribuição acumulada dos valores calculados, demonstrando o comportamento dos sistemas diante dos 2.000 casos simulados de variáveis aleatórias. Outro ponto importante que pôde ser visto no capítulo foi a análise da estimativa da economia mensal e anual alcançada pela Embaixada devido a produção de energia elétrica pelo SGFV,

nos últimos 3 anos. O mesmo estudo também foi realizado para o caso de os dois sistemas, SGFV e SGE, estarem em pleno funcionamento.

5.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O trabalho possibilitou a compreensão da importância de realizarem-se estudos como esse no planejamento de instalações de sistemas de geração distribuída. Um dos pontos mais importantes na análise da viabilidade de determinado tipo de fonte, é a observação das condições climáticas na região. Foi possível observar que o clima da região, aliado ao fato de a instalação do SGE não ter sido feita de modo a otimizar seu desempenho com microturbinas localizadas em uma altura abaixo da adequada, não favorece a utilização do sistema, pois a velocidade do vento não atinge valores que proporcionem uma geração considerável de energia elétrica. Por outro lado, o estudo realizado no SGFV mostrou que esse sistema possibilitou uma geração de energia maior que a do SGE, comparando-as à capacidade de cada sistema. Isso se deve ao fato de que a irradiação solar incidente na região garante um bom aproveitamento do SGFV em alguns períodos do dia.

Outro aspecto importante que foi analisado diz respeito às curvas de rendimento parcial dos sistemas, que tiveram uma boa faixa de valores, estando em torno dos 90%. Quando se trata do rendimento total, que é analisado a partir do aproveitamento da energia proveniente da irradiação solar, observa-se que os valores são muito baixos. Sendo assim, é importante que se desenvolvam estudos voltados para o aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos, o que traria maior competitividade no que diz respeito a inserção desta fonte no atual sistema de energia elétrica.

Enfim, fica claro que a utilização da GD é uma boa solução para os problemas encontrados atualmente no fornecimento de energia, sendo uma boa alternativa para o aumento de demanda por energia elétrica e para amenizar os problemas relacionados ao meio ambiente.

5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Alguns trabalhos podem ser desenvolvidos dando continuidade ao tema abordado. Dessa forma seguem algumas sugestões:

- avaliação econômica do SGFV e do SGE, considerando o custo dos equipamentos e da instalação e verificando os retornos financeiros que os sistemas proporcionaram;

- estudo voltado para o atual funcionamento dos dois sistemas, considerando necessidades de manutenção e avaliação prática do estado dos equipamentos;
- avaliação dos locais que possuem condições favoráveis de vento para utilização das microturbinas do SGE.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. P. (2013). Análise da inserção econômica da geração distribuída fotovoltaica no mercado brasileiro. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 78p.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

_____. *Atlas de Energia Elétrica – 2ª edição – 2005.*

_____. *Banco de Informação de Geração – 2012.*

CAMARGOS, R. S. C. (2013). Análise técnica de impactos e limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em uma rede radial de distribuição – Estudo de caso para o alimentador da Embaixada da Itália em Brasília. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 220p.

CASTRO, Marco Aurélio Lenzi. *Análise dos riscos de uma distribuidora associados à compra e venda de energia no novo modelo do setor elétrico.* 2004. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

DIAS, Marcos Vinícius Xavier; BORTONI, Edson da Costa; HADDAD, Jamil. Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras. IN: Revista Brasileira de Energia, Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, Itajubá, Brasil v. 11, n. 2, p. 137-156, 2005.

Sistema FIRJAN. *Análise da qualidade da matriz energética mundial – 2012.*

FGV – Fundação Getúlio Vargas. *Petróleo continuará a dominar a matriz energética mundial nas próximas décadas – 2013.*

IEA-PVPS – International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme. *Annual Report 2012 – 2012.*

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em fevereiro de 2014.

MME – Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional (BEN) - 2012.* Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: fevereiro de 2014.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. NASA Map of World Solar Energy Potential. Disponível em: <www.nasa.gov>. Acesso em 14 de janeiro de 2013.

PAIVA, R. R. C.; VILLA, L. F. L.; ZÜRN, H. H. Algoritmo para Avaliação de Impacto da Geração Distribuída em Redes de Distribuição. Departamento de Engenharia Elétrica UFSC, Florianópolis, SC, 2009.

PEREIRA, R. C. (2013). Impactos da inserção de um sistema de micro-geração eólica distribuída para um alimentador radial real e suas unidades consumidoras. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132p.

Portal Brasil. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/>>. Acesso em: fevereiro de 2014.

PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Disponível em: <www.pucrs.br>. Acesso em: fevereiro de 2014.

RODRIGUEZ, Carlos Roberto Vervantes. Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ROMAGNOLI, Henrique Cesar. Identificação de barreiras à geração distribuída no marco regulatório atual do setor elétrico brasileiro. 2005. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SEVERINO, M. M (2008). Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas da Amazônia. Publicação PPGENE.TD 027/08. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SHAYANI, R. A. (2006). Medição do Rendimento Global de um Sistema Fotovoltaico Isolado Utilizando Módulos de 32 Células. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-265/06, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 184p.

SHAYANI, R. A. (2010). *Método para Determinação do Limite de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica em Redes de Distribuição Radial*. Tese de Doutorado em

Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD051/10, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161p.

VECCHIA, Rodnei. *Impactos provocados por usinas hidrelétricas*, 2012.

VERONESE, Hermano Dumont. *Análise econômico-financeira de fontes alternativas no atendimento a uma carga isolada considerando incertezas*. 2004. 66 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica)–Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.